
DIPLOMARBEIT

Herr
Steffen Oehme

**Modellierung eines repräsen-
tativen Sektors des Stromver-
teilungsnetzes vom Stand
2010 bis 2050 in der Simulati-
onssoftware PORTUNUS**

Mittweida, 2012

DIPLOMARBEIT

Modellierung eines repräsentativen Sektors des Stromverteilungsnetzes vom Stand 2010 bis 2050 in der Simulationssoftware PORTUNUS

Autor:

Herr Steffen Oehme

Studiengang:

Elektrotechnik

Seminargruppe:

ET05wE1

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Lutz Rauchfuß

Zweitprüfer:

Dipl.-Ing. Jan Roloff

Einreichung:

Mittweida, 28.02.2012

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2012

Bibliografische Beschreibung:

Oehme, Steffen:

Modellierung eines repräsentativen Sektors des Stromverteilernetzes vom Stand 2010 bis 2050 in der Simulationsumgebung PORTUNUS – Erweiterung bestehender Modelle und Simulation eines Phasenschieberbetriebes

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Elektro- und Informationstechnik, Diplomarbeit, 2012

Referat:

Die vorliegende Arbeit soll Grundlagen der Simulation in Portunus erarbeiten um einen Ausblick auf die sich wandelnde Energieversorgung von 2010 bis 2050 geben zu können. Es werden Modelle in Form von Subsheets und Subsystemen in Portunus erstellt, die zur Simulation einfacher Energienetze notwendig sind. Zur Generierung belastbarer Aussagen zum Energiefluss im Verteilernetz und der Beherrschung der Rechenzeit musste eine Modelldetaillierung gefunden werden die gekennzeichnet ist durch Wegfall von Transformatoren und Sicherheitselementen im 10kV Netz bei konstanten 50Hz.

Inhalt

Inhalt I

Abbildungsverzeichnis..... III

Tabellenverzeichnis VI

0 Übersicht 1

0.1 Vorwort 1

0.2 Aufgabenstellung 2

1 Simulationsmodelle 3

1.1 Last 4

1.2 Leitung 12

1.3 Erzeuger 16

1.3.1 Realisierung der Leistungsbegrenzung 17

1.3.2 Portierung des Kraftwerksmodell in ein Subsheet 22

1.3.3 Spannungsreglermodul „U_KW“ 25

1.3.4 Phasenschiebermodul „I_KW“ 30

1.4 Messgerät 40

2 Simulationsergebnisse..... 41

2.1 Spannungstoleranz 41

2.2 Scheinleistungsbegrenzung..... 42

2.3 Phasenschieberbetrieb 47

2.4 Tageslastgang 54

3 Fazit..... 58

Literatur 59

Anlagen 61

Anlagen, Teil 1 1

Anlagen, Teil 2..... 5

Anlagen, Teil 3.....	6
Selbstständigkeitserklärung	9

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Übersicht elektrisches Energienetz	3
Abbildung 2 Lastmodell der Standardbibliothek	4
Abbildung 3 Lastmodell (Widerstandsnetzwerk)	5
Abbildung 4 Lastmodellversuch – Optimierung der Zuschaltpunkte	5
Abbildung 5 Lastmodell - gesteuerte Stromquelle	6
Abbildung 6 Zustandsgraph Lastmodell	7
Abbildung 7 Lastmodelle Wirkleistungsvergleich	9
Abbildung 8 Lastmodelle Wirkleistungsvergleich (ohne Spannungseinfluss)	10
Abbildung 9 Lastmodelle Blindleistungsvergleich (ohne Spannungseinfluss)	11
Abbildung 10 Lastmodelle Blindleistungsvergleich	12
Abbildung 11 einphasiges Leitungsmodell von Portunus.....	13
Abbildung 12 reduziertes π – Ersatzschaltbild	13
Abbildung 13 Simulationsaufbau für Vergleichsrechnung.....	15
Abbildung 14 vorhandenes Kraftwerksmodell	17
Abbildung 15 Leistungsdiagramm eines 500MW Generators des Kraftwerkes Jähnschwalde	18
Abbildung 16 Vergleichsnetzwerk zur Ermittlung der Scheinleistungsgrenze	19
Abbildung 17 Scheinleistungsgrenze in Abhängigkeit der Phasenverschiebung.....	19
Abbildung 18 Leistungsdiagramm eines Synchronmotors [Thiem11]	20
Abbildung 19 Vergleich Zustandsgraphen der Spannungsregelung (links ohne, rechts mit Leistungsbegrenzung).....	20

Abbildung 20 Schematik des vorhandenen Kraftwerksmodell.....	23
Abbildung 21 nachträgliche Übernahme von Initialisierungswerten	24
Abbildung 22 Subsystem „U_KW“ _ Schematik, verwendete Subsheets	25
Abbildung 23 Aufbau zur Demonstration „U_KW“	29
Abbildung 24 Demonstration Leistungsbegrenzung	30
Abbildung 25 Subsystem "I_KW" - Schematik, verwendete Subsheets	31
Abbildung 26 Zustandsgraph „I_KW“	31
Abbildung 27 Aufbau zur Demonstration „I_KW“	37
Abbildung 28 Demonstration „I_KW“ Wirkleistung	38
Abbildung 29 Demonstration „I_KW“ Blindleistung	38
Abbildung 30 Demonstration „I_KW“ Phasenstrom	39
Abbildung 31 Demonstration „I_KW“ Phasenverschiebung in $[\cos(\Phi)]$	39
Abbildung 32 Leistungsbegrenzung - Aufbau der Simulation	42
Abbildung 33 Scheinleistungsverlauf ($Q = 200\text{MVar}$).....	43
Abbildung 34 Wirk- und Blindleistungsverlauf ($Q = 200\text{MVar}$)	44
Abbildung 35 Scheinleistungsverlauf ($Q = - 40\text{MVar}$).....	45
Abbildung 36 Wirk- und Blindleistungsverlauf ($Q = - 40\text{MVar}$)	46
Abbildung 37 Simulationsaufbau ohne Leitungsmodell	48
Abbildung 38 U_KW ohne Leitungseinfluss	48
Abbildung 39 I_KW ohne Leitungseinfluss	49
Abbildung 40 Last ohne Leitungseinfluss	49
Abbildung 41 Simulationsaufbau mit Kabel	50
Abbildung 42 U_KW mit 30km langem Kabel	50

Abbildung 43 I_KW mit 30km langem Kabel.....	51
Abbildung 44 Last mit 30km langem Kabel.....	51
Abbildung 45 Simulationsaufbau mit Freileitung	52
Abbildung 46 U_KW mit 30km langer Freileitung	52
Abbildung 47 I_KW mit 30km langer Freileitung	53
Abbildung 48 Last mit 30km langer Freileitung	53
Abbildung 49 Vergleich Standardlastprofil H0 2011.....	55
Abbildung 50 Aufbau der Simulation.....	55
Abbildung 51 U_KW Leistungs- und Spannungskurven	56
Abbildung 52 I_KW Leistungs- und Spannungskurven.....	56
Abbildung 53 Last Leistungs- und Spannungskurven.....	57

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Erklärung des Zustandsgraphen des Lastmodells	7
Tabelle 2 Übersicht der Lastmodelle	8
Tabelle 3 Vergleich der Berechnungsmodelle	16
Tabelle 4 Leistungsbegrenzung – zusätzliche Variablendefinitionen	21
Tabelle 5 Änderungen im Spannungsregler des Kraftwerkmodells	22
Tabelle 6 Parameter des Kraftwerk Subsheets	23
Tabelle 7 Ausgabewerte des Kraftwerk Subsheets	24
Tabelle 8 Erklärung Zustandsgraph „U_KW“	29
Tabelle 9 Erklärung Zustandsgraph „I_KW“ - äußerer Kreis.....	33
Tabelle 10 Erklärung Zustandsgraph „I_KW“ - innerer Kreis	36
Tabelle 11 Variablen des Spannungstoleranzbandes	41
Tabelle 12 Leitungsparameter	48

0 Übersicht

0.1 Vorwort

Mit dem 1997 ausgehandelten „Kyoto-Protokoll“ zum UN-Rahmenübereinkommen über Klimaänderungen haben sich die Industriestaaten verpflichtet, die Emissionen von sechs Treibhausgasen innerhalb des Zeitraumes 2008 bis 2012 um mindestens 5 Prozent gegenüber dem Niveau von 1990 zu senken. Die Zielmarke für Deutschland ist dabei eine Emissionsminderung von 21 Prozent. Das deutsche Energie- und Klimaprogramm basiert auf der Erkenntnis, dass Energie weit effizienter eingesetzt werden muss als heute und CO₂-arme Energien verstärkt zum Einsatz kommen müssen.

Eine vom Bund beauftragte Studie beschreibt den Wandel von einer zentralen, konventionellen hin zu einer dezentralen, regenerativen Energieerzeugung. Die unetische Verfügbarkeit regenerativer Energiequellen wie Wind und solare Strahlung in Verbindung mit der Stilllegung von Atommeilern, stellen die Netzbetreiber vor neue Probleme. Das bisher stabilste Energienetz Europas, wird durch die Anbindung großer regenerativer (z.B. Off-shore Windparksanlagen [WebH09]) und vieler kleiner dezentraler Einspeiser vor neue Herausforderungen gestellt. Der unidirektionale Lastfluss bisheriger Großkraftwerke wandelt sich zu multidirektionalen Lastflüssen von Energieversorgern verschiedener Bilanzkreise und Einspeisepunkten. Das erhöhte „Verkehrsaufkommen“ auf dem historisch gewachsenem Übertragungs- und Verteilungssystem bringt die Netzelemente an ihre Grenzen. Die Planung, sowie Realisierung neuer Trassen und Kraftwerke ist kostenintensiv und zeitaufwändig. Eine wirtschaftlichere Alternative stellt die Verwendung von flexiblen Drehstromübertragungssystemen (FACTS) dar. Diese erlauben lokale Anpassungen und Kompensation von Oberschwingungen, Blindströmen, sowie der Steuerung des Lastflusses. In Verbindung mit dem Modell Virtueller Kraftwerke bildet es Ansatz vieler Forschungsgrundlagen. Es sei hierbei auf das E-Energy Projekt, die SmartGrid - Initiative oder DEZENT (Realzeit - Multiagentensystem der TU Dortmund) verwiesen. Des Weiteren ist das Projekt „Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität“, Sorgenkind und Retter zugleich. Durch den Wegfall großer Atommeiler 2011, reduziert sich die Reserveleistung des deutschen Energienetzes. Anfängliche Vermutungen dass es zu kritischen Betriebszuständen in Zeiten großer Last kommt, wurden mit dem Winter 2012 widerlegt. Trotz Wegfall 8 großer Atommeiler verzeichnete Deutschland einen Stromexport [StrR12]. Jedoch sind die Auswirkungen weiterer Projekte noch nicht berücksichtigt. So soll die e-Fahrzeugflotte und deren Ladestation als mobile Speicher genutzt werden, um die Energieflüsse im Verbundnetz zu stabilisieren [Bund12]. D.h. Lastspitzen mindern und die Grundlast erhöhen. Und genau hier soll die Simulation in Portunus ansetzen, indem man einen Teil des Netzes nachbildet und durch Manipulation des Lastflusses kritische Betriebszustände erkennt und optimierte, sowie wirtschaftliche Lösungsstrategien findet

0.2 Aufgabenstellung

Um eine Prognose auftretender Problemstellungen generieren zu können, die mit dem Wandel der Energieerzeugung erzwungen werden, ist das Simulationsmodell eines repräsentativen Sektors des Stromverteilernetzes zu erstellen. Hierbei soll Portunus der Firma Adapted Solutions zum Einsatz kommen.

Das Modell soll zur Untersuchung des Energieflusses und zur Gewährleistung der Netzspannungsqualität entsprechende Modelle zur Spannungshaltung, Phasenschiebung, Leitungsnachbildung und zum Verbrauch beinhalten. Für die Parametrierung dienen Angaben von Vattenfall, EnviaM sowie allgemeiner Richtlinien des BDEW (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft).

Zur Einschränkung des Umfanges wurden für alle Elemente des Energienetzmodells folgende Festlegungen getroffen:

- Netzebene 10kV
- Netzfrequenz starr bei 50Hz
- Keine Verwendung von Transformatoren
- Steuerung mittels Zustandsgraphen
- Einphasige Netzabbildung

1 Simulationsmodelle

Zur Simulation eines Energienetzes sind Modelle zur Darstellung der einzelnen Komponenten notwendig. Die drei großen Gruppen Erzeugung, Übertragung und Verbrauch sind hierfür in dieser und der vorangegangenen Arbeit [MeyNi12] bearbeitet worden. Dieses Kapitel beschreibt den aktuellen Aufbau und die Funktionsweise der einzelnen Komponenten.

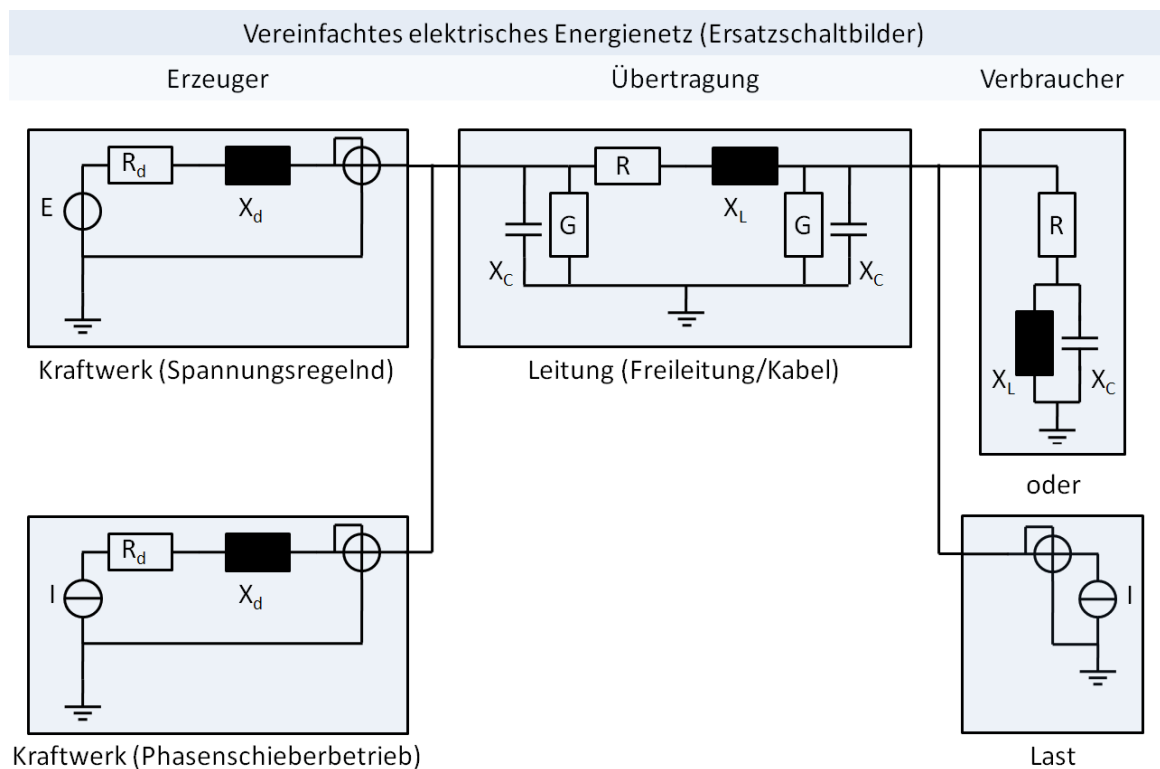


Abbildung 1 Übersicht elektrisches Energienetz

1.1 Last

Das vorhandene Verbrauchermodell (nachfolgend Lastmodell genannt) der Standard Bibliothek (Abbildung 2) ist eine Parallelschaltung aus Widerstand und einer Induktivität. Sie wird mittels der Vorgabewerte für Spannung, Frequenz und Leistungsaufnahme gesteuert. Achtung: "Der Blindleistungsumsatz kann nicht negativ werden (interne Beschränkung)" [AdSol10]

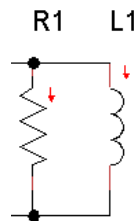


Abbildung 2 Lastmodell der Standardbibliothek

Um diesen Mangel zu beseitigen, wurde ein anderes Modell entwickelt (Abbildung 3). Hierbei wird der Widerstand je nach Vorzeichen der Phasenverschiebung mit einer Kapazität oder einer Induktivität in Reihe geschaltet. Diese Variante birgt den systematischen Fehler, dass neben Wirkleistung auch Blindleistung bezogen oder abgegeben werden muss. Ein Vorgabewert Null führt zu unzulässigen Werten, als Folge konvergiert der Solver nicht. Die Ermittlung¹ der Resistanz und der Reaktanzen erfolgt über die Vorgabewerte für Frequenz, Wirkleistung, Phasenverschiebung und Spannung. Zu Beginn meiner Arbeit wurde anstelle einer festen Spannungsvorgabe, der gemessene Effektivwert zur Berechnung der Werte herangezogen. Mit dem ungewolltem Ergebnis das sich die Impedanz der Last mit der Spannung änderte. Weiterhin zeigte sich eine Überlagerung des gewollten Wechselstromes mit einem abklingenden Gleichstromanteil beim Ändern der Blindlast. Um dieses Effekt² zu mindern oder gar zu entfernen wurden mehrere Varianten getestet. Eine dieser Varianten die das Zuschalten des Blindelementes beeinflusst wird in Abbildung 4 gezeigt.

¹ Formeln und weiterführende Erklärungen siehe [MeyNi12]

² Rush-Effekt: Stoßströme zum Auf-/Entladen von elektrostatischen und elektromagnetischen Feldern

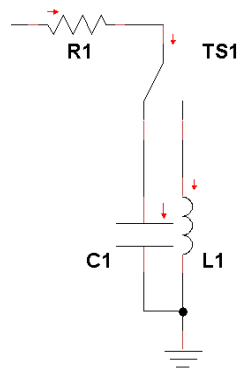


Abbildung 3 Lastmodell (Widerstandsnetzwerk)

Hier wurde versucht die Zuschaltunkte der Blindelemente durch Verzögerungsglieder umzusetzen. Mit dem Ziel die Spule zum Spannungsmaxima und den Kondensator zu Spannungsnulldurchgang zu schalten. Die Verwendung von zwei separaten Zustandsgraphen wurde zur Trennung der Funktionen gewählt. Da die Verbesserungen im Verhältnis zum Rechenaufwand gering ausfielen, wurde dieses Netzwerk nicht weiter verwendet.

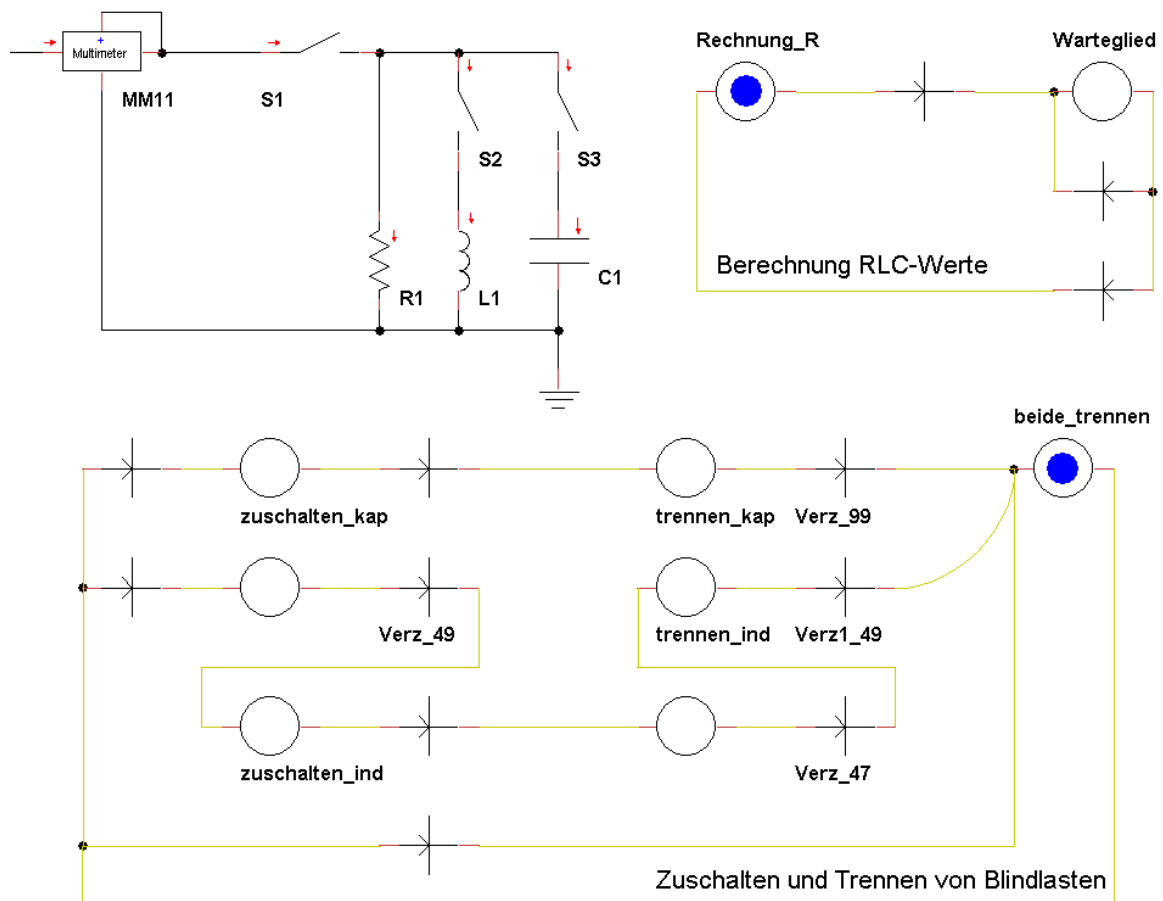


Abbildung 4 Lastmodellversuch – Optimierung der Zuschaltunkte

Das von mir erstellte Modell (Abbildung 5) ersetzt alle diskreten Elemente durch eine gesteuerte ideale Stromquelle. Diese wird durch die Funktion [1] angesteuert.

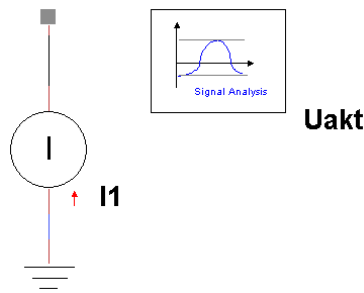


Abbildung 5 Lastmodell - gesteuerte Stromquelle

$$i(t) = I * \sqrt{2} * \sin(2\pi * freq * t - \varphi) \quad [1]$$

Im Verhältnis zu den anderen Modellen zeigt die gesteuerte Stromquelle ein schnelleres Ansprechen, eine Umgehung des Rush-Effektes, eine Beachtung des spannungsabhängigen Laststromes und eine höhere Genauigkeit bei verschiedenen Iterationsschrittweiten des Simulators. Der verwendete Zustandsgraph (Abbildung 6) besteht aus zwei Zweigen. Die Erklärung erfolgt in Tabelle 1. Mit Ausnahme von [5] werden nur Standardformeln verwendet. Die Berechnung des effektiven Laststromes wird durch einen Vergleich beeinflusst. Ist der Vergleich

- „wahr“ erfolgt die Ausgabe des Stromwertes,
- „falsch“ wird eine Null als Stromwert ausgegeben.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad [2]$$

$$\varphi = \text{sign}(Q) * \cos^{-1}\left(\frac{|P|}{S}\right) \quad [3]$$

$$Z = \frac{U_n^2}{S} \quad [4]$$

$$I = \frac{U_{\text{aktuell}}}{Z} * (\text{verbunden} == 1) \quad [5]$$

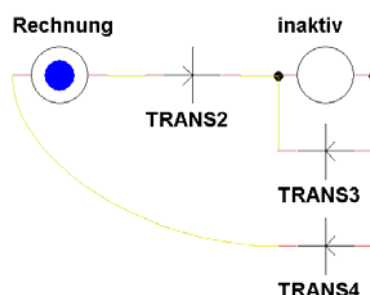


Abbildung 6 Zustandsgraph Lastmodell

	Bezeichnung	Inhalt	Beschreibung
Berechnung der Impedanz	TRANS4	$(P \neq P_{tmp}) \ $ $(Q \neq Q_{tmp})$	Übergang von „inaktiv“ bei: Änderung des Wirk- oder Blindleistungswertes
	Rechnung	1. $P_{tmp} = P$ 2. $Q_{tmp} = Q$ 3. [2] 4. [3] 5. [4] 6. wait##0u	Berechnung von Scheinleistung, Phasenwinkel und Impedanz
	TRANS2	wait == 1	Übergang zu „inaktiv“
Berechnung Laststrom	TRANS2	wait == 1	Eingang
	inaktiv	1. [5] 2. wait##10m	Berechnung des Laststromes, getrennte Last -> Laststrom gleich Null
	TRANS4	$(P \neq P_{tmp}) \ $ $(Q \neq Q_{tmp})$	Übergang zu „Rechnung“
	TRANS3	Wait == 1	Neustart von „inaktiv“

Tabelle 1 Erklärung des Zustandsgraphen des Lastmodells

Die folgende Tabelle soll eine kurze Übersicht vom Aufbau, Parametrierung und Rückgabewerte geben.

	Modell der Standardbibliothek	Vorläufiges Modell	Eigenes Modell
Übergabeparameter	$U, f, P, Q, I_{blind_anfang}$	$U, f, P, \cos(\bullet),$ syszeit	$U_n, freq, P, Q,$ verbunden

Vorgabewerte	Feste Werte	Feste Werte, t-Y-Tabelle	Feste Werte, t-Y-Tabelle
Induktive Blindleistung	Nur Bezug	Bezug und Abgabe	Bezug und Abgabe
Konzept	Reihenschaltung $R + X_L$	Reihenschaltung $R + X_L$ oder $R + X_C$	Ideale gesteuerte Stromquelle
Rückgabewerte	V, I, P	-	Aktualisierung, $\cos\phi$, S_a

Tabelle 2 Übersicht der Lastmodelle

Die folgenden Abbildungen sollen die Überlegenheit der gesteuerten Stromquelle gegenüber dem vorläufigem Lastmodell eines Widerstandsnetzwerkes zeigen. Das Hauptaugenmerk ist dabei auf die spannungsbedingte Leistungsänderung, die Abweichungen zum Vorgabewert, sowie die Schalt- und Rechenbedingten Spitzen zu legen.

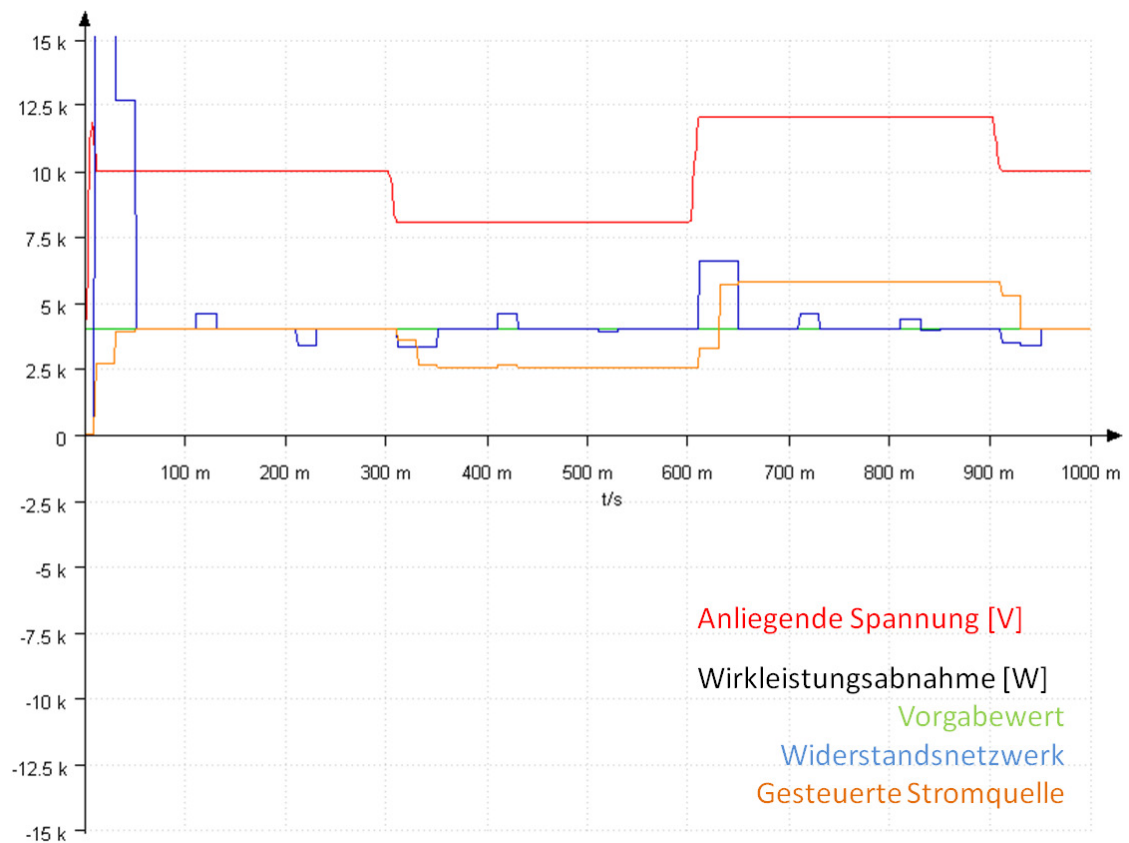


Abbildung 7 Lastmodelle Wirkleistungsvergleich

Beiden Lastmodellen wurde eine konstante Wirkleistung vorgegeben. Diese sollte sich mit dem Quadrat der Spannungsänderung ebenfalls ändern, da der Widerstand konstant bleibt. Das Lastmodell der Stromquelle arbeitet erwartungsgemäß. Das Widerstandsmodell tut dies nicht, da es sich mit dem Ziel einer konstanten Leistungsabnahme an die Spannung anpasst (Abbildung 7).

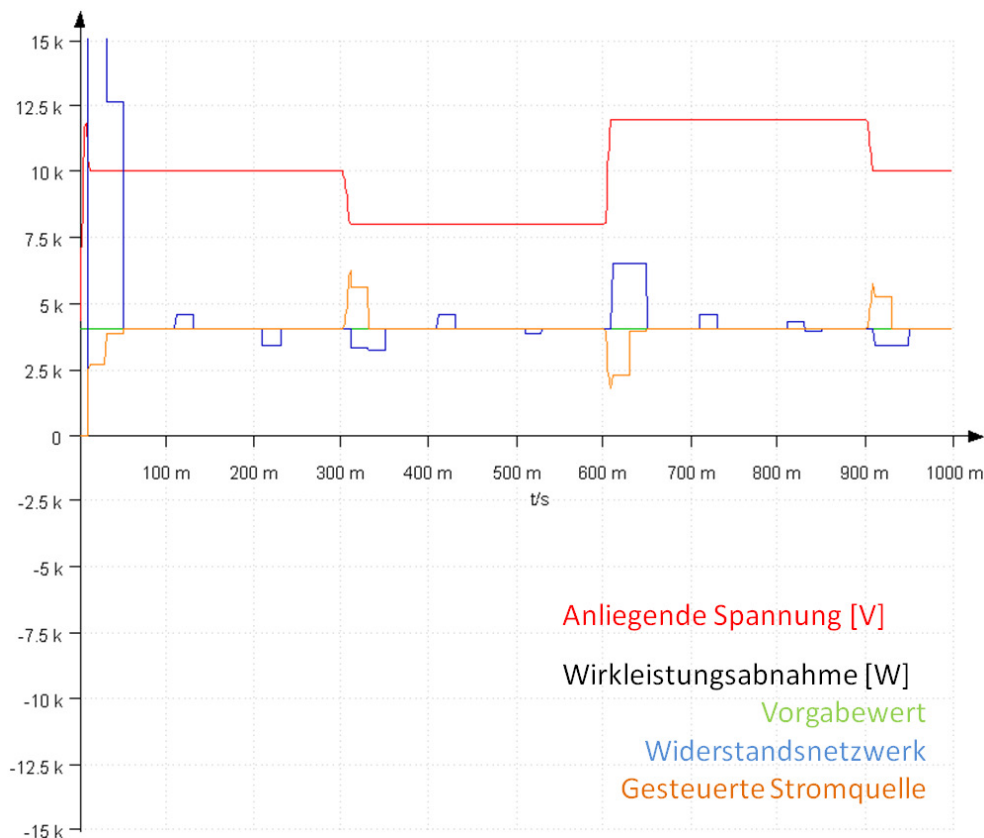


Abbildung 8 Lastmodelle Wirkleistungsvergleich (ohne Spannungseinfluss)

Beim heraus rechnen des Spannungseinflusses auf die Leistungsabnahme (Abbildung 8) zeigt sich, dass die gesteuerte Spannungsquelle weniger Spitzen hat und diese zusätzlich kleiner ausfallen. Die Spitzen sind Änderungen im Stromfluss, der durch Änderung der Spannung und des Blindleistungsbezuges beeinflusst wird. Da die Stromquelle den Phasenwinkel problemlos verschieben kann, treten keine Spitzen beim Umschalten des Blindleistungsbedarfes (induktiv/kapazitiv) auf. Folglich ist es dem Widerstandsnetzwerk überlegen, da hier die Elemente beim Schalten Stoßströme verursachen.

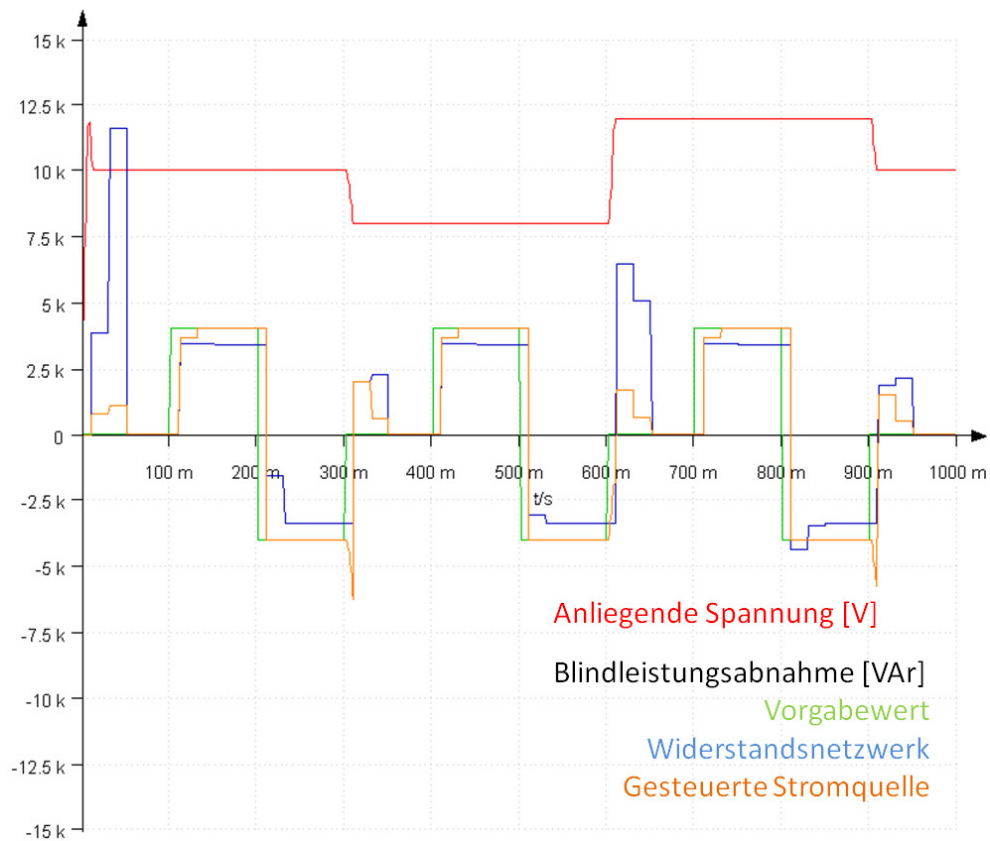


Abbildung 9 Lastmodelle Blindleistungsvergleich (ohne Spannungseinfluss)

Diese Stoßströme sind noch deutlicher beim Betrachten der spannungsbefreiten Blindleistung zu erkennen (Abbildung 9). Da bei jeder Änderung der Leistungsvorgabe und des anliegenden Spannungswertes die Impedanz neu berechnet wird, tritt dieser Rush-Effekt hier häufiger auf. Weiterhin, kann bei einem ungünstigen Berechnungszeitpunkt eine abklingende Spannungserhöhung oder –absenkung die Folge sein. Dies kann zu falschen Interpretationen der Ergebnisse führen. Bei dem Lastmodell der gesteuerten Stromquelle treten diese Effekte nicht auf.

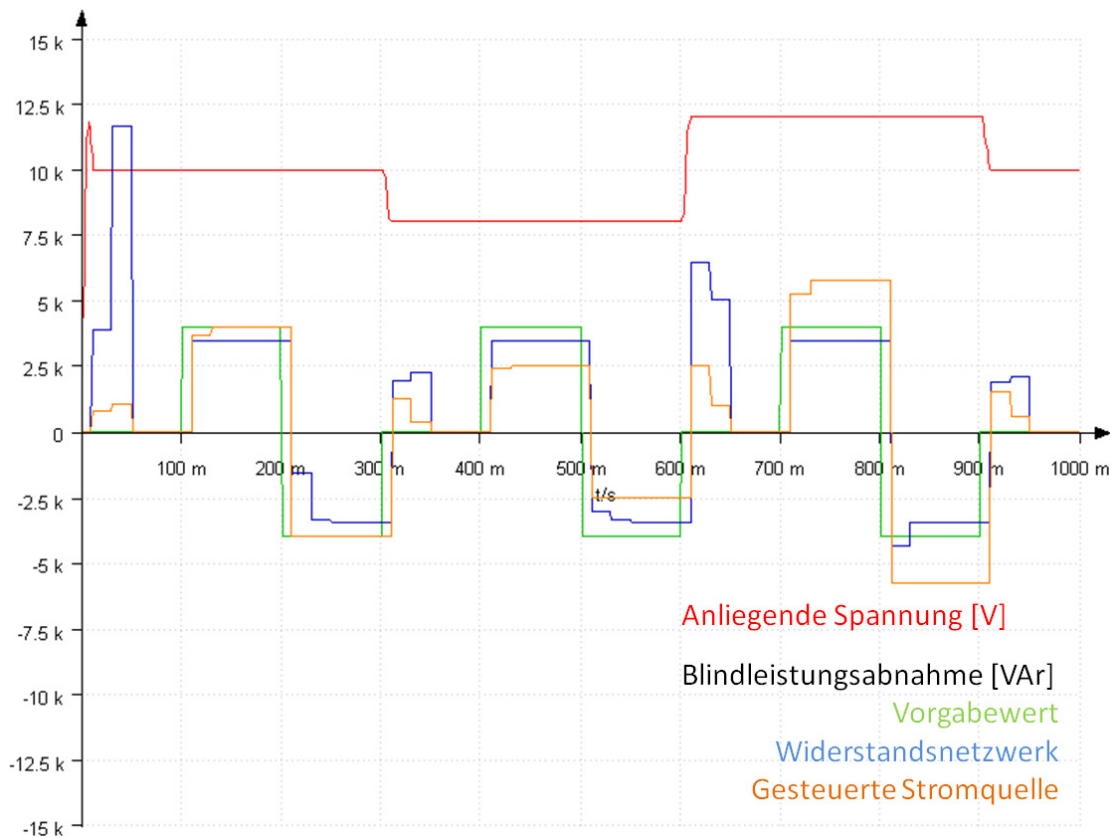


Abbildung 10 Lastmodelle Blindleistungsvergleich

Vollständigerhalber, wird in Abbildung 10 der Einfluss der Spannungsänderung auf die Blindleistung gezeigt. Das Modell der Stromquelle funktioniert richtig. Die Blindleistung folgt wie die Wirkleistung dem Quadrat der Spannungsänderung.

Der direkte Vergleich beider Modelle zeigt, dass das Lastmodell der gesteuerten Stromquelle genauer, schneller und einfacher ist. Der Vergleich zum Standardlastmodell von Portunus wurde in [MeyNi12] zum oben verwendeten Lastmodell des Widerstandsnetzwerkes gemacht, und entfällt dadurch.

1.2 Leitung

Da der Energieverbraucher nur selten direkt am Erzeuger ist, muss der Strom über Leitungen zu ihm gebracht werden. Diese Leitungen haben je nach Aufbau, Installationsart und Länge verschiedene Leistungsaufnahmen. Darunter sind Wirkleistungsverluste aufgrund des Widerstandes und Blindleistungsverluste durch Umladen von elektrischen und magnetischen Feldern zu verstehen. Umwelteinflüsse wie Temperatur und Feuchtigkeit wurden nicht berücksichtigt.

Portunus hält in seiner Standard Bibliothek unter „Passive Components“ zwei Leitungsmodelle zur Verfügung. Ein einphasige Modell „Line – Single Phase“ (Abbildung 11) und ein dreiphasiges Modell „Line – Three Phase“. Beide verwenden eine Reihenschaltung

aus linearem Widerstand und Induktivität. Für einfache und schnelle Betrachtungen reicht dieses Modell aus. Aber zur Simulation von Effekten wie dem Ferranti – Effekt³ oder Differenzierung der Leitungsarten⁴ muss auch der Einfluss elektrischer Felder berücksichtigt werden. Dies geschieht unter Hinzunahme eines Kapazitätsbelages.



Abbildung 11 einphasiges Leitungsmodell von Portunus

Das erstellte Leitungsmodell entspricht einem reduziertem π – Ersatzschaltbild (Abbildung 12). Auf die Einbeziehung des Ableitwiderstandes wird verzichtet, da bei späteren Simulationen reale Leitungsparameter eines Energienetzes des lokal-ansässigen Stromverteilers verwendet werden. Dessen Vorgaben beinhalten nur die Nennspannung, die maximale Strombelastung, sowie die Resistanz-, die Reaktanz- und die Kapazitätsbeläge. Des Weiteren wurden auch keine Warnsysteme implementiert die die Gültigkeit des Ersatzschaltbildes kontrolliert und die Spannungs- und Stromwerte zur Vermeidung von realen Isolatordurchschlägen, thermischen Überlastungen oder zu großen Spannungsabfällen prüft.

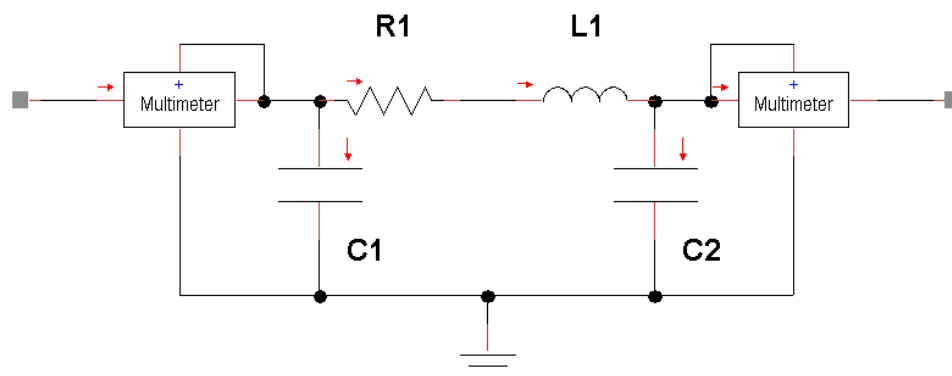


Abbildung 12 reduziertes π – Ersatzschaltbild

Zusätzlich wurden weitere Parameter für die Leitungslänge, ein Faktor für die Anzahl parallel laufender Leitungen mit identischen Werten und zwei Messstellen hinzugefügt. Die Messstellen dienen einerseits für optionale Analysezwecke während der Simulation und andererseits als Ausgangspunkt für spätere funktionale Erweiterungen wie die Ermittlung des Spannungsfalls, des Leistungsbedarfs, oder der Auslastung der Leitung.

Die Validierung der verwendeten Formeln [6], [7] und [8] geschah über eine Vergleichsrechnung (siehe Anlagen Teil1). Hierbei wurde das verwendete π – Ersatzschaltbild mit den Ergebnissen einer Zweitor Rechnung verglichen. Die Parameter des Vergleichsmodells werden über die Formeln der Wellentheorie [9][10] ermittelt. Durch festgelegte Vereinfachungen dieser Theorie entsteht das π – Ersatzschaltbild. Es darf daher nur verwen-

³ betriebsfrequente Spannungsüberhöhung infolge eines kapazitiven Ladestromes

⁴ Kabel (kapazitiver Leitungscharakter) und Freileitung (induktiver Leitungscharakter)

det werden, wenn es sich um eine elektrisch kurze Leitung handelt. Die Formel [11] entstammt der Vorlesungsreihe Energieübertragung und Verteilung [KISi08] und dient zur Abschätzung ob eine Leitung noch als elektrisch kurz angesehen werden kann⁵. Wird dieses Kriterium nicht erfüllt, ist die Abweichung durch die getroffenen Vereinfachungen im π – Ersatzschaltbild nicht mehr vernachlässigbar klein. Des Weiteren wird durch das Hinzufügen des Faktors für parallele Leitungssysteme von den Grundlagenformeln abgewichen. Ein direkter Vergleich der Rechenergebnisse der Simulation mit denen der Zweitor Rechnung zeigt erstens das [6][7][8] verwendbar sind, und zweitens wie hoch die Abweichungen sind.

$$R1 = \frac{R' * Laenge}{n} \quad [6]$$

$$L1 = \frac{X' * Laenge}{n} \quad [7]$$

$$C1 = \frac{C' * Laenge * n}{2} \quad [8]$$

$$Z_w = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \quad [9]$$

$$\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} \quad [10]$$

$$8 * \text{Netzfrequenz} < \frac{1}{2\pi\sqrt{0,5 * C' * L' * Laenge}} \quad [11]$$

Der Aufbau (Abbildung 13) wurde stark vereinfacht, um die Anzahl der Fehlerquellen zu minimieren. Eine ideale Spannungsquelle für den Erzeuger, das Leitungsmodell mit den Parametern einer Freileitung, ein Standardmultimeter, und eine Parallelschaltung als Verbraucher. Die Blockmodelle „MM kit“ sind portierte Messgeräte (siehe Kapitel 1.4) die zur Berechnung von Effektivwerten und der Phasenverschiebung von Strom zu Spannung verwendet werden.

Die Vorgaben der Leitungsparameter liefert die Datenbank der Simulationssoftware Cerberus von Adapted Solutions. Da die Leitungsparameter der Enviam für 20kV Systeme sind, die Systemvorgabe aber nur 10kV ist; wurden anhand eines Abgleichs mit der Cerberus Datenbank die entsprechenden Leitungstypen ermittelt und die Werte der für 6/10 kV Systeme verwendet. Die Festlegungen für die Last sind in beiden Berechnungen iden-

⁵ Grobe Richtlinie bei 50Hz: Freileitungen kürzer 250km, Kabel kürzer 50km (Quelle [OtJu94])

tisch. Zur Berechnung des Laststromes für die Zweitor Rechnung wird die Lastspannung der Simulation verwendet.

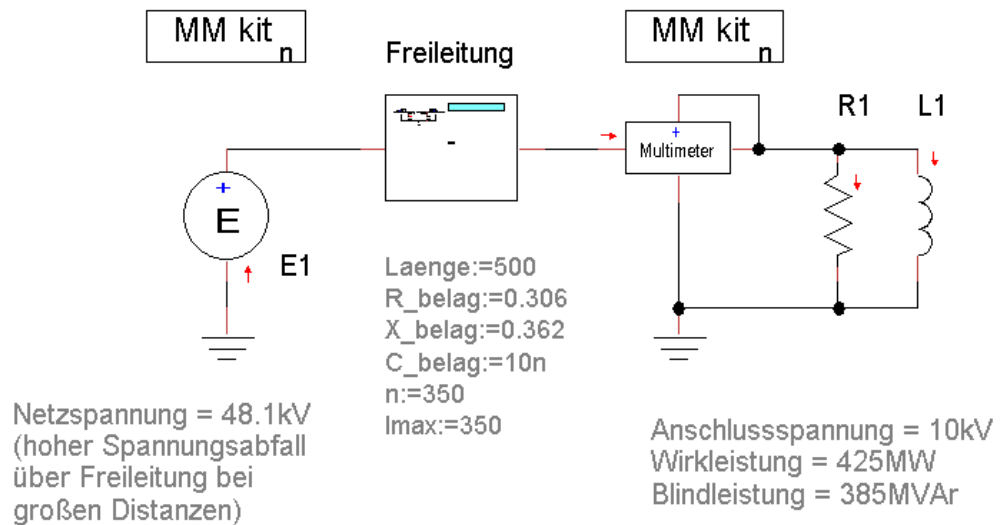


Abbildung 13 Simulationsaufbau für Vergleichsrechnung

Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse zweier Durchläufe. Wie zu erkennen ist tritt nur eine geringe Abweichung beider Rechenmodelle auf, solange das π – Ersatzschaltbild verwendet werden kann. Erst beim Überschreiten der maximal zulässigen Leitungslänge für eine elektrisch kurze Leitung, treten grobe Abweichungen auf.

		Ergebnisse aus Portunus	Ergebnisse von der Zweitorrechnung
Leitung = 1km	Quelle - Wirkleistung [MW]	427.76	427.88
	Quelle - Blindleistung [MVar]	387.75	388.29
	Last - Wirkleistung [MW]	424.82	425
	Last - Blindleistung [MVar]	384.45	385
Länge = 500km	Quelle - Wirkleistung [MW]	1833.63	1660.5
	Quelle - Blindleistung [MVar]	1346.35	1341.8

	Last - Wirkleistung [MW]	430.88	425
	Last - Blindleistung [MVar]	385.75	385

Tabelle 3 Vergleich der Berechnungsmodelle

Fazit: Das Leitungsmodell entspricht den Anforderungen. Es kann mit realen Werten parametrisiert werden, ist in der Lage parallele Leitungssysteme mit denselben Parametern zu berücksichtigen und wurde mit Messstellen versehen um später weitere Funktionen zu implementieren. Wie zum Beispiel Ermittlung des Spannungsfalls oder des Blindleistungsbedarfs.

1.3 Erzeuger

Für den einphasigen Wechselstrombetrieb lassen sich aus der Standardbibliothek von Portunus nur die idealen Quellen von Strom und Spannung verwenden. Es existieren Modelle für elektrische Maschinen, jedoch sind diese entweder für Gleichstrom oder 3-phasigen Wechselstrom ausgelegt. Die Zusatzbibliothek „Power Electronics“ erweitert die Grundausstattung mit weiteren Modellen wie zum Beispiel verschiedene einphasige und mehrphasige Umrichter, sowie elektrische Transformationen und Quellen. Hier ist das „Single Phase Network“ oder dessen Blockvariante „SinglePhase Block“ unter „Auxiliary Models/Variable Sine Wave Sources/PowSrcVvar1...“ sowie unter „Auxiliary Models/V/f Control/PowSrcVf1...“ zu erwähnen. Die Variante Vvar ist die Vereinigung der idealen induzierten Spannungsquelle mit der „Sine Wave“ Funktion der Standardbibliothek. Die Variante Vf ergänzt das Vvar Modell um die Möglichkeit einer frequenzabhängigen Amplitude. Da beide Modelle nicht dafür konstruiert sind, während eines Simulationsvorganges aktiv die Phasenverschiebung zu manipulieren, sind auch sie ungeeignet.

Da neben dem Aufbau, auch mehrere Regelfunktionen integriert werden, wurde den einzelnen Funktionen folgende Priorität zugeordnet:

- I. Einhaltung der Leistungsgrenze des Kraftwerkes
(maximale mögliche Scheinleistung)
- II. Blindleistungsforderung vor Wirkleistungsforderung
- III. Einhaltung des Spannungstoleranzbandes bei Normalbetrieb
(10kV +/- 2%)

Bei der vorangegangenen Arbeit [MeyNi12] wurde ein einphasiges Kraftwerksmodell (Abbildung 14) entwickelt. Der Kraftwerksgenerator wird durch eine ideale Spannungsquelle mit zusätzlichem Innenwiderstand und Reaktanz hinreichend modelliert. Zur Einstellung der Phasenverschiebung wird je nach Blindleistungsbedarf ein Kondensator oder eine Spule parallel zum Netz geschaltet. Ein Zustandsgraph regelt die Höhe der benötig-

ten Reaktanz dazu aus. Der Transformatorblock zur Anpassung der Generatorklemmen-
spannung an die angeschlossene Netzebene wurde vernachlässigt. Dies geschah zur
Einsparung zeitintensiver Rechenschritte. Die Umsetzung der Leistungsbegrenzung (Ka-
pitel 1.3.1), sowie das Umschreiben des Kraftwerksschemata in ein Netzwerkmodell für
die Bibliothek wird unter (Kapitel 1.3.2) beschrieben. Weitere Erläuterungen zum Aufbau
und der Funktionsweise, sowie die Validierung dieses Modells befindet sich ebenfalls un-
ter [MeyNi12].

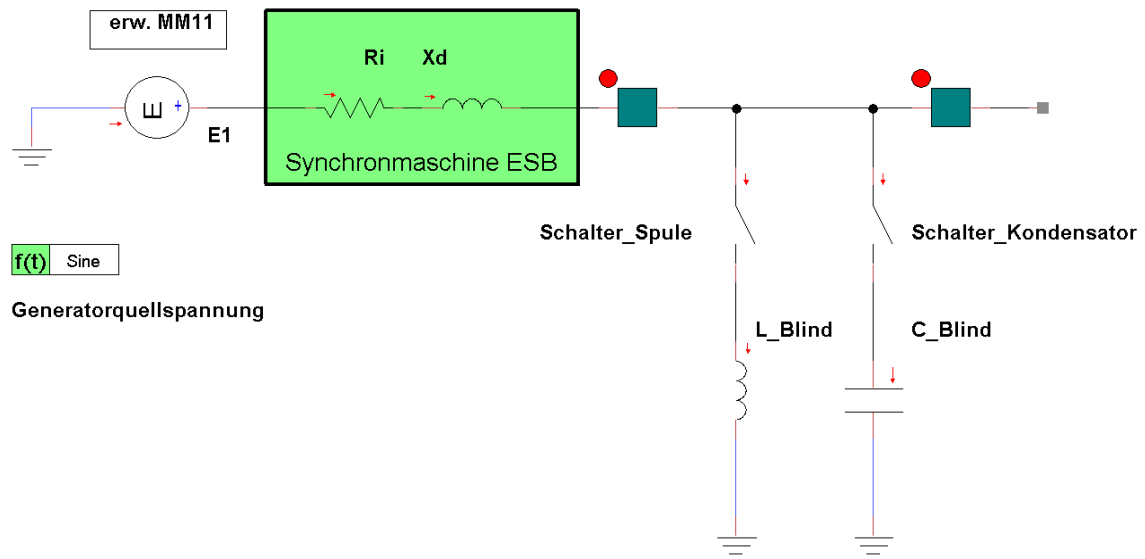


Abbildung 14 vorhandenes Kraftwerksmodell

Für Untersuchungen zum Thema Phasenschieberbetrieb ist diese Kraftwerk zu komplex.
Folglich wurden kleinere Varianten mit dedizierten Aufgaben erstellt:

- Spannungsreglermodul (Kapitel 1.3.3)
- Stromreglermodul (Kapitel 1.3.4)

Diese stellen Grundlage für die späteren Untersuchungen des Phasenschieberbetriebes
dar. Bei der Entwicklung dieser Module fließen Erfahrungen aus dem existierenden Kraft-
werksmodell ein.

1.3.1 Realisierung der Leistungsbegrenzung

Vorangegangene Versuche das Leistungsdiagramm eines realen Kraftwerksgenerators in
das einphasige Simulationsmodell zu implementieren waren nicht erfolgreich. Die direkte
Verwendung einer $Q - P$ – Tabelle zur Scheinleistungsbegrenzung funktioniert nicht. Je-
doch kann der dabei verwendete Grundstromkreis aus Quelle und Widerstand mit defi-
nierbarer Charakteristik verwendet werden, um eine vom Verschiebungsfaktor $\cos(\varphi)$
abhängige Scheinleistungsgrenze zu ermitteln. Als Vorgabewerte des Grundstromkreises
wird der aktuelle $\cos(\varphi)$ – Wert und eine $\cos(\varphi) - S$ –Tabelle des verwendeten Genera-
tors benötigt. Der aktuelle Wert wird mittels Messgerät berechnet und bezieht sich auf die
Effektivwerte von Strom und Spannung der letzten 20ms.

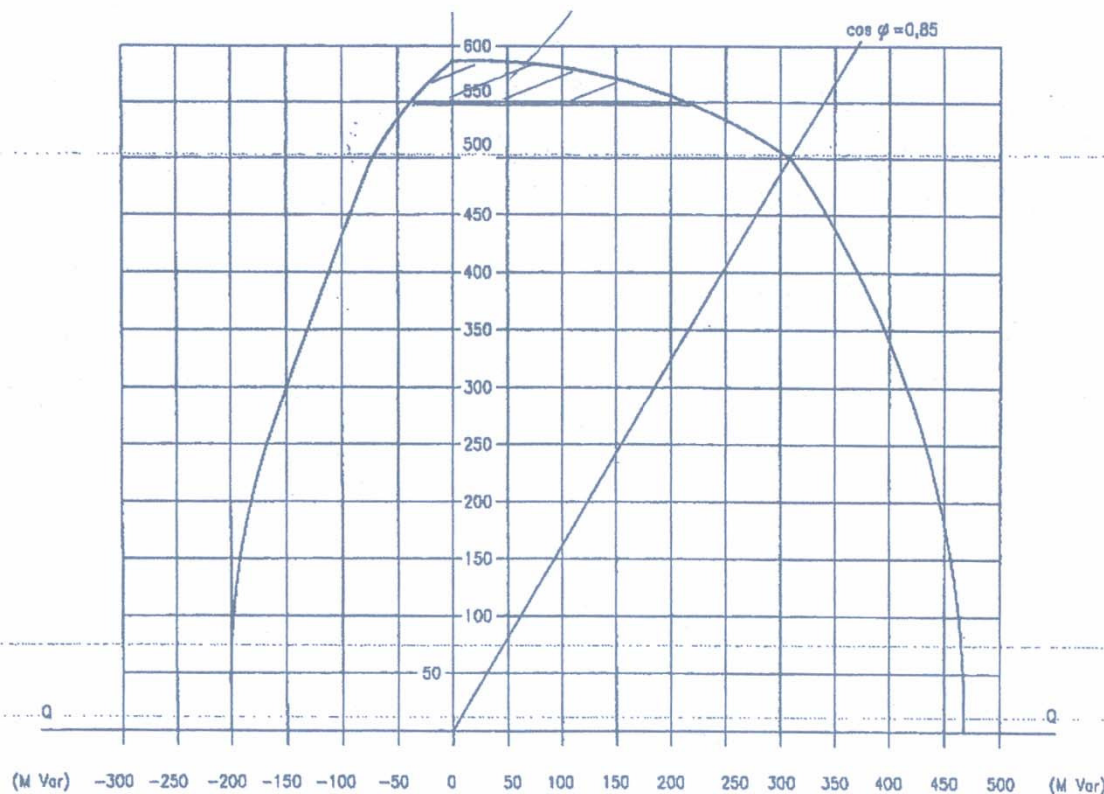


Abbildung 15 Leistungsdiagramm eines 500MW Generators des Kraftwerkes Jähnschwalde

Die Berechnung der $\cos(\varphi) - S$ -Tabelle erfolgt nicht online während der Simulation, sondern gesondert im Vorfeld mit einer MathCAD14-Datei (Anlage Teil 2). In Hinsicht auf regenerative Energiequellen, könnten auch Messwerte eines Gutachtens [TW11] verschiedener Windkraftanlagen verwendet werden, um diese Anlagen nachzubilden.

Als Berechnungsgrundlage dient eine PQ - Matrix in Tabellenform. Es ist zu beachten das die Matrix vorzeichenbehaftet von $-Q_{\max}$ bis $+Q_{\max}$ aufgestellt werden muss. Weiterhin wird die Bemessungsleistung P_n benötigt, um die Ausgabevektoren zu normieren. Ein normierter Vektor hat mehrere Vorteile:

- Einbinden schwankender P_{\max} bei regenerativen Stromerzeugern
- $\cos(\varphi) - S$ -Tabelle im Subsheet problemlos implementierbar

Nach der Berechnung der Ausgabevektoren werden diese zusammengefasst und in die Textdatei „Leistungsbegrenzungstabelle.txt“ geschrieben.

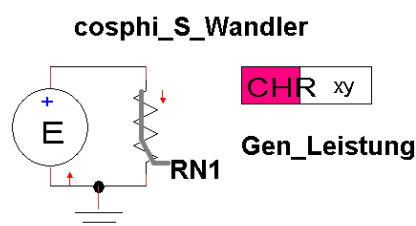


Abbildung 16 Vergleichsnetzwerk zur Ermittlung der Scheinleistungsgrenze

Jetzt sollte in Portunus das Vergleichsnetzwerk (Abbildung 16) aus einer induzierten Spannungsquelle (E), einem „Non-Linear Resistor“ (RN) und einer „2D-Look-Up Table“ (CHR XY) erstellt werden. Innerhalb der Charakteristiktabelle werden zwei beliebige x-Werte erstellt und in eine xy-Datei gespeichert. Mit einem einfachen Texteditor sind diese zwei Werte durch die Rechenergebnisse aus der Textdatei zu ersetzen. Zum Abschluss wird die Datei in die „CHR XY“ Tabelle eingelesen und erneut abgespeichert.

Abbildung 17 zeigt wie sich die maximale mögliche Scheinleistung bei verschiedenen Phasenlagen der Spannung zum Strom ändert. Das Vorzeichen der Phasenverschiebung deutet nur auf den Charakter der Blindleistung hin. Ein negativer Wert bedeutet kapazitive Blindleistung, und ein positiver Wert bedeutet induktive Blindleistung. Der Sprung von -1 auf +1 ist ein bekanntes Problem des Messgerätes und wird in dessen Kapitel 1.4 erläutert. Weiterhin ist ein unsymmetrischer Verlauf der Leistungsgrenzkurve zu erkennen. Sie hat ihre Ursachen in den technischen Grenzen des Generators. Abbildung 18 zeigt wie thermische Einflüsse im Läufer- und Ankerkreis, sowie der Polradwinkel Einfluss auf die maximale Leistung hat.

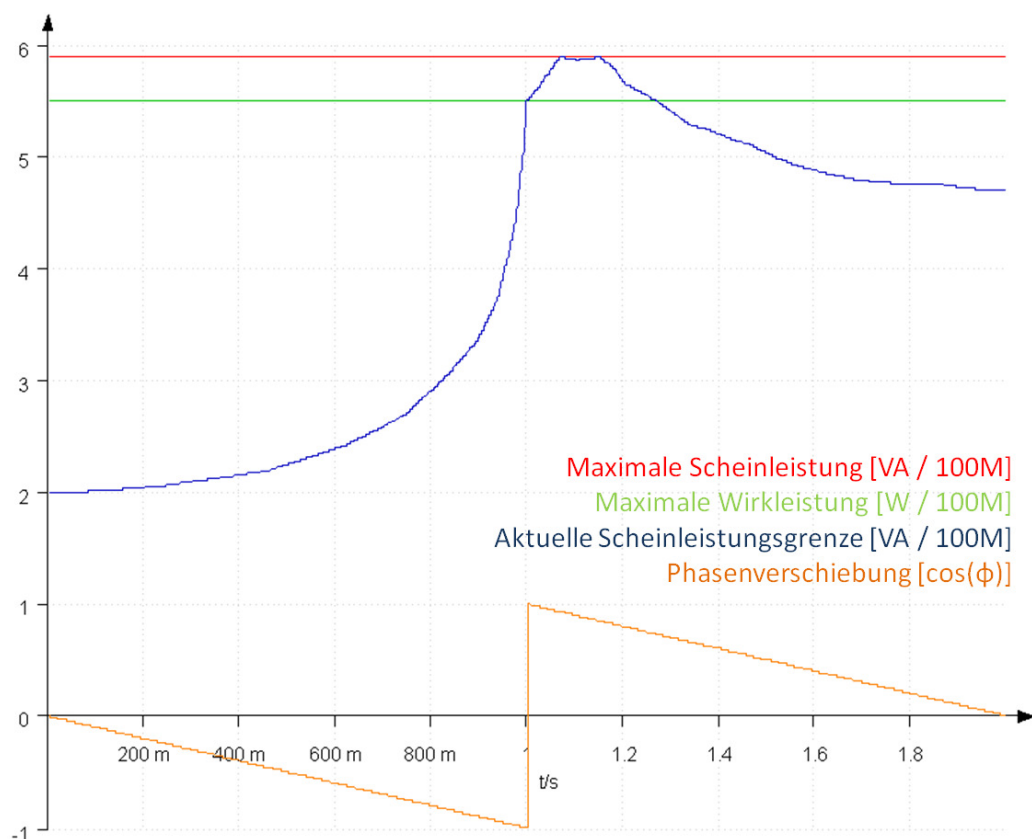
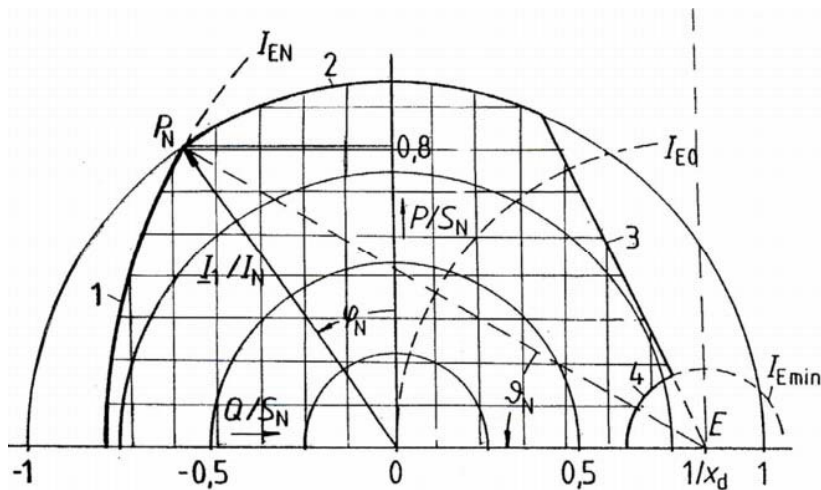


Abbildung 17 Scheinleistungsgrenze in Abhängigkeit der Phasenverschiebung

Das für Abbildung 17 verwendete Leistungsdiagramm, wurde aus Abbildung 15 ermittelt. Da der Generator neben der vollen Wirkleistung von 550MW noch etwas Blindleistung abgeben kann, steigt die maximal abgebare Leistung bis zu 588MVA an.



Grenzlinien:

1. Kreisbogen für Erregung mit $I_{EN} \rightarrow$ Grenze für Läufererwärmung
2. Kreisbogen für $I_1 = I_N \rightarrow$ Grenze für Ständerwicklungserwärmung
3. Gerade für praktische Stabilitätsgrenze $\rightarrow \delta_p \approx 75^\circ$
4. Kreisbogen für Mindesterregungsstrom \rightarrow Mindestkippmoment

Abbildung 18 Leistungsdiagramm eines Synchronmotors [Thiem11]

Die Regelung der Leistungsbegrenzung ist im Grunde ein Vergleich zwischen dem aktuellen und dem maximal zulässigen Scheinleistungswert. Dabei wirkt sich die „CHR XY“ Charakteristik indirekt auf die Spannungshöhe aus. Hierzu wird mit Hilfe eines Messgerätes (Kapitel 1.4) die Phasenverschiebung an der Spannungsquelle des Kraftwerkes berechnet und als Vorgabewert der transienten Spannung für E des Vergleichsnetzwerks verwendet. Der sich darauf einstellende Stromwert durch den variablen Widerstand R_N entspricht dem genormten maximalen Scheinleistungswert. Gemäß der Überlegung dass mit steigender Last die maximale Leistung des Generators nicht überschritten werden darf, muss die Spannung zusammenbrechen um die Leistung konstant zu halten (Gleichung [12]).

$$S = U \cdot \bar{I}$$

[12]

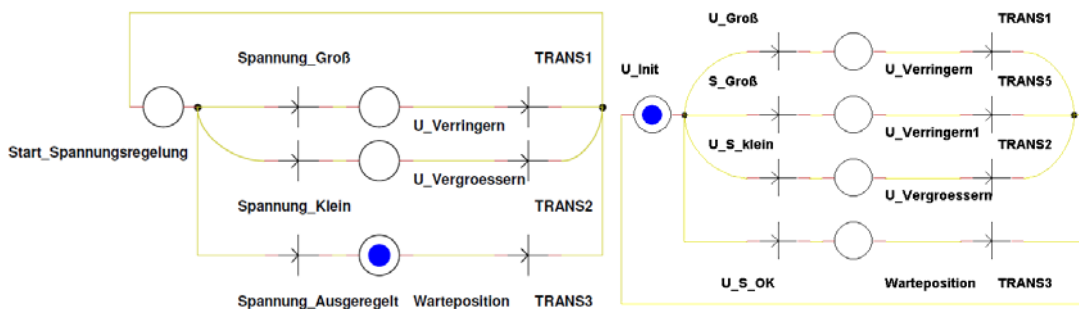


Abbildung 19 Vergleich Zustandsgraphen der Spannungsregelung (links ohne, rechts mit Leistungsbegrenzung)

Um der allgemeinen Struktur und Funktionsweise des vorhandenen Spannungsreglers (aus dem Kraftwerksmodell von [MeyNi12]) treu zu bleiben, wurden nur geringfügige Änderungen vorgenommen. Neben dem Hinzufügen nachstehender Variablen (Tabelle 4) zur Definitionstabelle, wurde ein neuer Zweig in den Zustandsgraphen eingebracht, sowie ein paar Zeilen und Bedingungen (Tabelle 5) eingefügt. Der neue Zweig dient zur Spannungsabsenkung sobald die maximale Leistungsgrenze überschritten wird. Er arbeitet

vergleichbar mit dem schon existierenden Spannungssenkungszweig Spannung_Groß. Er ist ihm aber übergeordnet. Die zusätzlichen Bedingungen dienen zur Einflechtung des neuen Zweiges in die Gesamtstruktur (Abbildung 19). Für eine weiterführende Erklärung der grundsätzlichen Funktionsweise dieses Reglers sei auf [MeyNi12] verwiesen.

Bezeichnung	Beschreibung
PKWmax	Bemessungsleistung des Generators [W]
S_tabelle	Grenzwert der Generatorleistung in Abhängigkeit der Phasenverschiebung
S_TolOben	Faktor für obere Leistungsschwelle des Reglers
S_TolUnten	Faktor für untere Leistungsschwelle des Reglers

Tabelle 4 Leistungsbegrenzung – zusätzliche Variablendefinitionen

STATE / TRANSITION Bezeichnung	vorgenommene Änderung	Auswirkung / Aufgabe
Start_Spannungsregelung1 - zusätzliche Zeile	$S_tabelle = PKWmax * RN1.I$	Ermittlung Scheinleistungsgrenzwert für Eingangstransitionen
Spannung_Groß - zusätzliche Bedingung	$Multimeter_1Phasig1.Sa < (S_tabelle * S_TolOben)$	Transition bei Akt. Leistungswert kleiner als oberer Leistungsgrenzwert
Spannung_Klein - zusätzliche Bedingung	$Multimeter_1Phasig.Sa < (S_tabelle * S_TolUnten)$	Transition bei Akt. Leistungswert kleiner als unterer Leistungsgrenzwert

S_Groß - neuer Regelzweig	Multimeter_1Phasig1.Sa > (S_TolOben * S_tabelle)	höchste Priorität, keine weiteren Bedingungen Eingang des neuen Regelzweiges
U_Verringern1 - neuer Regelzweig	Struktur identisch U_Verringern2, mit Ausnahme folgender Anpassung: 1) Einfügen des akt. Grenzwert $S_tabelle = PKWmax * RN1.I$ 2) Ändern des Inhalts für SRDiff SRDiff = $(S_tabelle - Multimeter_1Phasig1.Sa) / (Multimeter_1Phasig1.Ia)$	Regler arbeitet wie bei U_Verringern2, nur Steuervariable reagiert jetzt auf die Differenz zur Leistungsgrenze und nicht bis zum Spannungssollwert
TRANS10 - neuer Regelzweig	Struktur identisch Ausgangsbedingung TRANS6 und TRANS7	Ausgang des neuen Regelzweiges
Warteposition1 - zusätzliche Zeile	$S_tabelle = PKWmax * RN1.I$	Ermittlung Scheinleistungsgrenzwert für Ausgangstransition
TRANS8 - zusätzliche Bedingung	Multimeter_1Phasig.Sa > (S_tabelle * S_TolOben))	Transition bei Akt. Leistungswert größer als oberer Leistungsgrenzwert

Tabelle 5 Änderungen im Spannungsregler des Kraftwerkmodells

Mit der Integrierung der Leistungsbegrenzung, ist der Regler in der Lage die Spannung bei Lastwechseln zu halten solange die Leistungsgrenze des Generators nicht überschritten wird. In Kapitel 2.2 wird die Leistungsbegrenzung untersucht.

1.3.2 Portierung des Kraftwerksmodell in ein Subsheet

Damit das Kraftwerk (Abbildung 20) aus [MeyNi12] sinnvoll bei späteren Simulationen elektrischer Energienetze verwendet werden kann, wird es in ein Subsheet der Userbibliothek „SmartGrid_Stand_Mrz2012“ unter der Bezeichnung „konvKW_Umsetzung_Nick“ portiert. Dies vereinfacht nicht nur die Handhabung und die Fehlersuche, sondern verringert auch die Anzahl dargestellter Elemente im finalen NetzsimulationsSchematik.

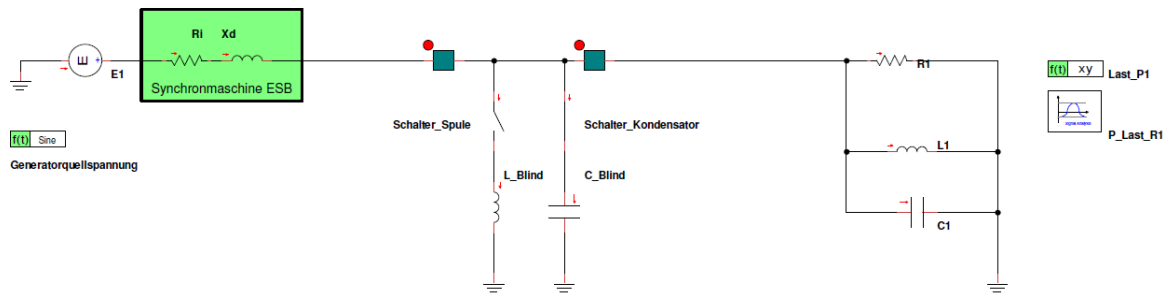


Abbildung 20 Schematik des vorhandenen Kraftwerksmodell

Zur schlichteren Bedienung wurde die Anzahl der Übergabeparameter so gering wie möglich gehalten. Es ergab sich folgende Parameterliste:

Bezeichnung	Standardwert	Beschreibung
Uln	14.14 k	Amplitude der Phasenspannung der Netzebene [V]
fnenn	50	Netzfrequenz im Normalbetrieb [Hz]
Vorgabe_CosPhi	0.85	Phasenverschiebung, Vorgabewert entspricht Auslegungswert eines Generators 0,85
Freigabe	0	Freigabe der Blindleistungsregelung, 0 - gesperrt 1 - freigegeben
Xgen	1 m	Generatorreaktanz [\bullet], Vorgabewert
Rgen	1 m	Generatorresistanz [\bullet], Vorgabewert
PKWmax	500 MW	Bemessungsleistungsgenerator [W], Vorgabewert

Tabelle 6 Parameter des Kraftwerk Subsheets

Da es nicht möglich ist von einem aktiven Schematik die internen Variablen eines Subsheets auszulesen, wurde ein Ausgabeset von Variablen erstellt ().

Bezeichnung	Beschreibung
SGrenze	Hüllkurve der Generatorleistungsgrenze [p.u.]
Sin	Leistung am Generator [VA]
Sex	Leistung am Kraftwerksabgang [VA]
UR_U	Klemmenspannung des Generator [V]
UR_Status	Status des Spannungsreglers
UR_Diff	Reglerwert [V]
QR_Diff	Status des Blindleistungsreglers

Tabelle 7 Ausgabewerte des Kraftwerk Subsheets

In Vorbereitung der Portierung wurden alle Hilfs- und Validierungselemente wie zum Beispiel die Lastelemente (parallelgeschaltene Glieder R1, L1, C1) oder Tabellen zur zeitbedingten Änderung bestimmter Variablen (Vorgabe_cos_phi, Last_P1) entfernt. Sämtliche Verknüpfungen mit diesen Elementen wurden durch einfache Variablen ersetzt. Während der Übertragung des Schematik in ein Subsheet traten unerwartete Probleme auf. So konnten in das ursprüngliche Modell die allgemeinen Startbedingungen der Regler direkt in der Variablendefinition verankert werden. Da aber bei der Initialisierung des Subsheets die Übergabeparameter noch nicht vorliegen, mussten diese nachträglich über einen Zustandsgraphen „Startwerte“ (Abbildung 21) festgelegt werden. „Startwerte“ wird nur einmal bei Beginn der Simulation ausgeführt. Die Transition „Warnungsverhinderer“ dient nur zur Umgehung eines Warnungshinweises bei der Simulation.

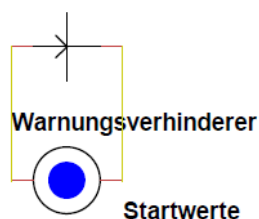


Abbildung 21 nachträgliche Übernahme von Initialisierungswerten

Ein weiteres Problem bereitete die Übergabe der $\cos(\varphi) - S$ – Tabelle der Leistungsbegrenzung. Eine Weitergabe der „CHR XY“ Tabelle oder eines Dateibezuges von außen in das Subsheet konnte nicht realisiert werden. Eine Lösung fand sich in der festen Implementation der normierten Tabelle im Subsheet in Verbindung mit dem Übergabewert der Bemessungsleistung PKWmax. Dies birgt das Problem, dass gegenwärtig alle Kraftwerke

dieselbe genormte Leistungskurve durchlaufen. Nur eine Änderung der Bemessungsleistung und die daraus resultierenden verschiedenen Kraftwerksleistungen sind möglich.

Die Portierung war erfolgreich. Die Funktionsweise wurde nur durch die fest implementierte Leistungskurve des Generators beeinträchtigt. Leistungs-, Spannungs- und Blindleistungsregelung des Subsheets arbeitet wie vorher als Teil des Schemata.

1.3.3 Spannungsreglermodul „U_KW“

Für genauere Untersuchungen des Phasenschieberbetriebes ist das Kraftwerksmodell zu umfangreich und unübersichtlich. Darum wurde auf Grundlage der gemachten Erfahrungen ein einfacheres Modul erstellt. Es besitzt die Fähigkeit die Spannung zu regeln und beachtet die Vorgaben zur Leistungsbegrenzung. Im Gegensatz zum Kraftwerk wird es aber in einem Subsystem auf dem jeweiligen Schematik sein. Wie bei einem Subsheet werden die Variablen nur über Übergabewerte beeinflusst und Ausgaben sind auch möglich. Zur schnelleren Kontrolle kann aber jede Variable des Subsystems von dem hierarchisch höher geordneten Schematik aus gelesen werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass Subsysteme problemlos kopierbar und anpassbar sind. So können auf einem Schemata mehrere Varianten desselben Subsystems existieren. Hierdurch konnte das Problem der festen Generatorleistungskurve umgangen werden.

Der Aufbau ist, wie beim Kraftwerk, die Umsetzung des Ersatzschaltbildes einer Synchronmaschine im einphasigem Betrieb (Abbildung 22). Ein Messgerät „MM_kit_E1“ (Kapitel 1.4), eine Messstelle „MM11“, zwei „Signal Analyzer“ und der regelnde Zustandsgraph (Abbildung 19 rechter Zustandsgraph) vervollständigen das Subsystem. Die Werte für R1 (Generatorresistanz), L1 (Generatorinduktivität) und E1 (Generatorspannung) werden nach den Formeln [13] [14] [15] eingelesen.

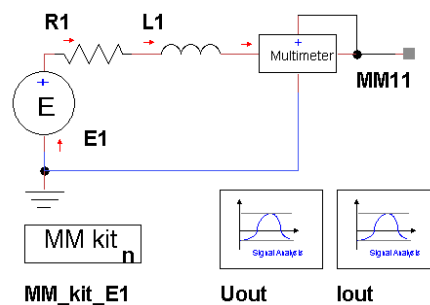


Abbildung 22 Subsystem „U_KW“ _ Schematik, verwendete Subsheets

Die Parameter R_d , X_d und freq sind Übergabeparameter des Schemata. U_Regler legt den Startwert des Spannungsreglers fest und wird danach durch den Regler angepasst. Und t ist die Laufzeitvariable der Simulation. Zur besseren Darstellung wurde π durch 1.41421 ersetzt.

$$R1 = R_d$$

[13]

$$L1 = \frac{X_d}{2\pi * freq}$$

[14]

$$u(t) = U_{Regler} * \sqrt{2} * \sin(2\pi * freq * t)$$

[15]

MM_kit_E1 greift auf die Augenblickswerte von E1 zu, und ermittelt neben Wirk- und Blindleistung auch die aktuelle Phasenverschiebung. Da Portunus das Verbraucherzählpfeilsystem (siehe Anlagen Teil 3) für seine idealen Spannungsquellen verwendet, wurde das Vorzeichen der Spannung im Messgerät negiert. Die „Signal Analyzer“ „Uout“ und „Iout“ beziehen sich auf die Augenblickswerte von MM11; sie die Effektivwerte von Strom und Spannung am Ausgang des Moduls. Das Integrationsintervall beider ist jeweils 20ms.

Bei der Spannungsregelung weicht dieses Modul von dem Prinzip des adaptiven Reglers [MeyNi12], wie es beim Kraftwerksmodell verwendet wird, ab. Es kommen PI - Regler zum Einsatz. Die einfache bekannte Struktur erlaubt es Fehlerquellen schnell zu finden und die Regelung durch zwei Übergabeparameter anzupassen. Die gegenwärtige Lösung mittels Zustandsgraphen ist zwar ausreichend, jedoch noch nicht Optimal. Eine Reduzierung auf die abstrakte Ebene des PI – Reglers würde Rechen- und Speicheraufwand weiter verbessern. Im Vergleich zur Regelstruktur des Kraftwerk Subsheets, konnte der Aufwand an Variablen und Rechenschritte in der Variablendefinition, sowie innerhalb jedes Zustandes verringert werden.

	Bezeichnung	Inhalt	Beschreibung
Beginn	U_Init	1. S_Huelle = PKWmax * RN1.I 2. S_tmp = Uout.RMS * Iout.RMS 3. wait##10m 4. U_geregelt##20m	Aktualisiert Leistungsabgabe und - grenzwert, startet Verzögerungstimer
Spannungsbegrenzung	U_Groß	(Uout.RMS > (Un * U_tolOben)) && (wait == 1) && (S_tmp < (S_Huelle * S_tolUnten)) && Reglerfreigabe	Eingang bei: 1. Überspannung 2. abgelaufener Verzögerung 3. Einhaltung der Leistungsgrenze 4. freigegebenem Regler

	U_Verringern	1. $URDiff = U_n - U_{out.RMS}$ 2. $URDiff2 = URDiff2 + URDiff * I_Faktor$ 3. $U_Regler = U_Regler + URDiff * P_Faktor + URDiff2$ 4. wait##10m 5. $SRDiff = 0$ 6. $SRDiff2 = 0$	Spannungsreduzierung mittels Spannungsdifferenz, Rücksetzen der Leistungsregelvariablen, Start Verzögerungstimer
	TRANS1	wait == 1	Ausgang
Leistungsbegrenzung	S_Groß	$(S_tmp > (S_Huelle * S_tolOben)) \ \&\&$ $(wait == 1) \ \&\&$ Reglerfreigabe	Eingang bei: 1. Überschreiten der Leistungsgrenze 2. abgelaufener Verzögerung 3. freigegebenem Regler
	U_Verringern1	1. $S_Huelle = PKWmax * RN1.I$ 2. $SRDiff = (S_Huelle - (U_{out.RMS} * I_{out.RMS})) / 10k$ 3. $SRDiff2 = SRDiff2 + SRDiff * I_Faktor$ 4. $U_Regler = U_Regler + SRDiff * P_Faktor * SRDiff2$ 5. wait##10m 6. $URDiff = 0$ 7. $URDiff2 = 0$	Reduziert Spannung aufgrund der Leistungsdifferenz zum Grenzwert, Faktor 10k ..., Start Verzögerungstimer, löscht Spannungsregelvariablen
	TRANS5	wait == 1	Ausgang
Spannungserhöhung	U_S_klein	$(U_{out.RMS} < (U_n * U_tolUnten)) \ \&\&$	Eingang bei:

		$(S_tmp < (S_Huelle * S_tolUnten)) \&\&$ $(wait == 1) \&\&$ Reglerfreigabe	1. Unterspannung 2. Einhalten der Leistungsgrenze 3. abgelaufenem Timer 4. freigegebenem Regler
	U_Vergroessern	1. $URDiff = U_n - U_{out.RMS}$ 2. $URDiff2 = URDiff2 + URDiff * I_Faktor$ 3. $U_Regler = U_Regler + URDiff * P_Faktor + URDiff2$ 4. $wait \#10m$ 5. $SRDiff = 0$ 6. $SRDiff2 = 0$	Spannungserhöhung anhand Differenzwert zur Sollspannung, Start Verzögerungstimer, Rücksetzen der Leistungsregelvariablen
	TRANS2	$wait == 1$	Ausgang
Ausgeregelt	U_S_OK	$U_geregelt == 1$	Eingang
	Warteposition	1. $S_Huelle = PKWmax * RN1.I$ 2. $SRDiff = 0$ 3. $SRDiff2 = 0$ 4. $URDiff = 0$ 5. $URDiff2 = 0$ 6. $wait \#10m$	Einlesen der Leistungsgrenze, Rücksetzen aller Regelvariablen, Start Verzögerung
	TRANS3	$((U_{out.RMS} > (U_n * U_tolOben)) \&\&$ $(U_{out.RMS} < (U_n * U_tolUnten)) \&\&$ $(U_{out.RMS} * I_{out.RMS}) > (S_Huelle * S_tolOben)) \&\&$ $(wait == 1)$	Ausgang bei: 1./2. Über-/Unterschreiten der Spannungsgrenzen 3. Überschreiten der Leistungsgrenze 4. abgelaufenem Timer

Tabelle 8 Erklärung Zustandsgraph „U_KW“

Zum Abschluss des Kapitels soll Abbildung 24 die Funktionsweise demonstrieren. Das Modul wird mit einer festen Induktivität und einer sich zeitlich ändernden Wirkleistung beaufschlagt (Abbildung 23). Die Grafik zeigt neben den Leistungsverläufen den Spannungsverlauf. Da die Regelung ein Toleranzband von $\pm 2\%$ U_n hat, überlagern sich die geforderte und die abgegebene Leistung auch innerhalb der Leistungsgrenze nicht. Ist die anliegende Spannung niedriger als die Nennspannung, so ist auch die Leistungsabnahme der Last geringer. An der oberen Toleranzgrenze verhält es sich analog dazu. Das Ansteigen der Spannung und der Leistung innerhalb der ersten Sekunden, stellt ein unter Last anfahrendes Kraftwerk dar. Zur Simulation eines in Betrieb befindlichen Kraftwerkes, muss vor Simulationsbeginn der Parameter „U_Regler“ auf entsprechenden Phasenspannungswert eingestellt werden. Weitere Informationen zum Spannungsregler finden sich im Kapitel 2.1 und zum Leistungsregler in den Kapiteln 1.3.1 und 2.2.

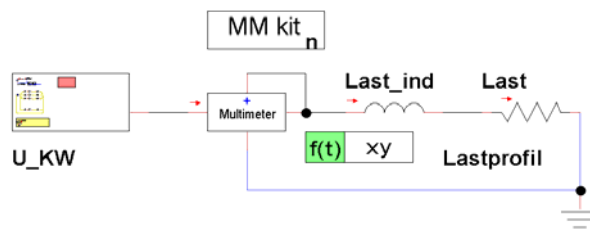


Abbildung 23 Aufbau zur Demonstration „U_KW“

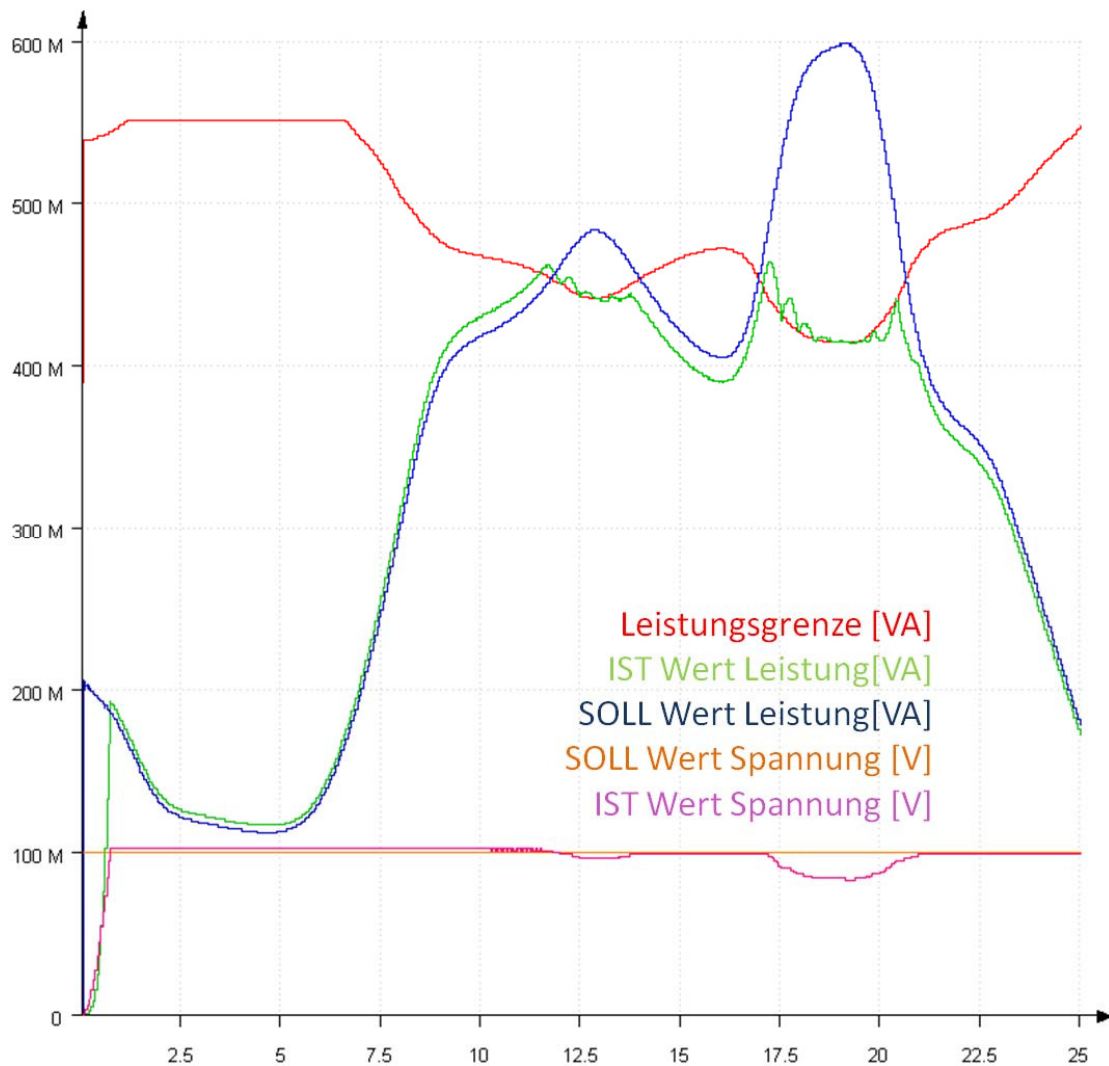


Abbildung 24 Demonstration Leistungsbegrenzung

Das Spannungsreglermodul „U_KW“ arbeitet erwartungsgemäß. Es beachtet das Toleranzband solange der Generator nicht überlastet wird.

1.3.4 Phasenschiebermodul „I_KW“

Um einen variablen Phasenwinkel auf Erzeugerseite einstellen zu können, muss mindestens ein Kraftwerk die Spannung vorgeben. Alle weiteren Kraftwerke unterstützen dann das spannungsregelnde Kraftwerk mit Wirk- und Blindleistung. Hierbei sollte es sich um ein stromgeregeltes Modul handeln, welches in Amplitude und Phasenlage flexibel vorgegeben werden kann. Der Aufbau (Abbildung 25) ist analog zum Spannungsreglermodul. Dies lässt sich auch an den verwendeten Formeln [16][17][18] erkennen. Der benötigte Variablenumfang wurde vergrößert um neben der Leistungsbegrenzung auch die Phasenverschiebung und eine Spannungsüberwachung zu realisieren. So wurde auch der Zustandsgraph (Abbildung 26) um einige Zweige erweitert. Die tabellarische Erklärung der einzelnen Zustände und Übergänge befindet sich in Tabelle 9 und Tabelle 10. Da der Zustandsgraph zwei Hauptfunktionen erfüllt, wurde dies durch zwei anstelle von einer großen Tabelle dargestellt. Tabelle 9, der „äußere Kreis“, erfüllt die Funktion der Spannungs-

überwachung. Tritt der Fall einer Unterspannung ein, wird in diesem Regelkreis der Strom des Phasenschiebers zurück genommen. Bis entweder die Spannung wieder den Mindestwert erreicht, oder der Strom auf Null sinkt. Tabelle 10 erläutert den „inneren Kreis“ des Reglers. Dieser hat die Aufgabe den Strom einzustellen und die Leistungsgrenze zu überwachen.

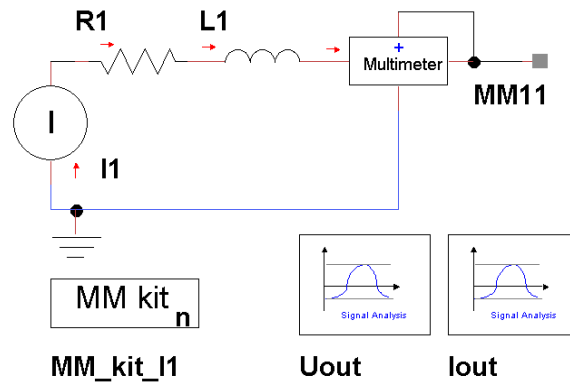


Abbildung 25 Subsystem "I_KW" - Schematik, verwendete Subsheets

$$i(t) = I_{Regler} * \sqrt{2} * \sin(2\pi * freq * t - \varphi) \quad [16]$$

$$R1 = R_d \quad [17]$$

$$L1 = \frac{X_d}{2\pi * freq} \quad [18]$$

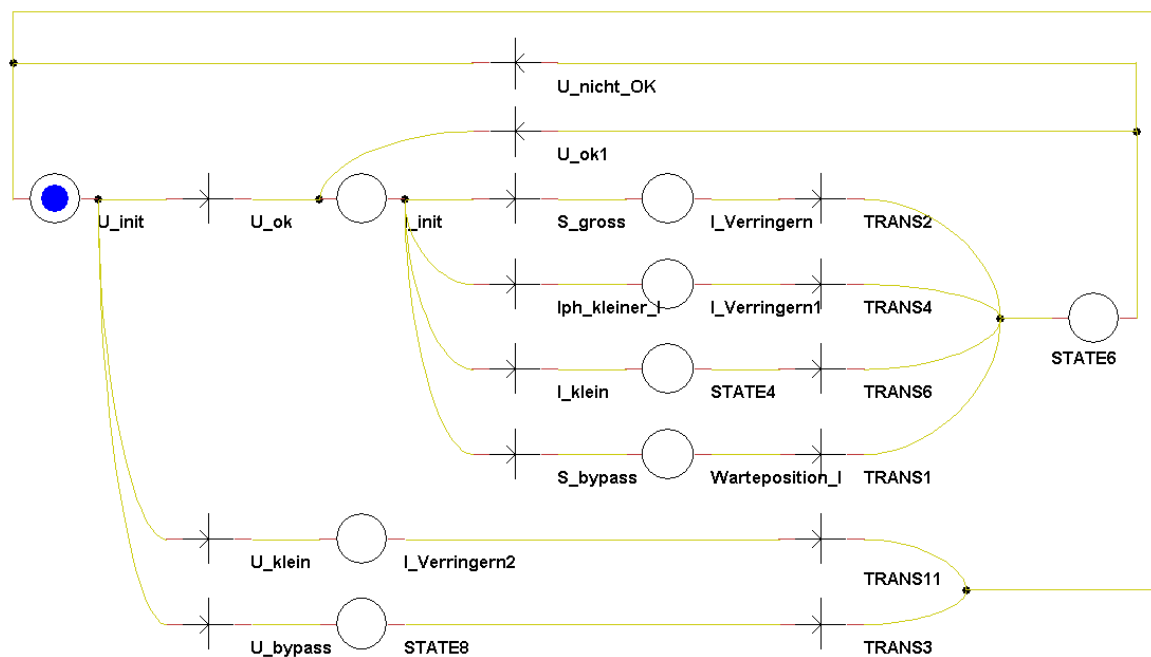


Abbildung 26 Zustandsgraph „I_KW“

	Bezeichnung	Inhalt	Beschreibung
Beginn	U_init	1. SRDiff = 0 2. SRDiff2 = 0 3. wait##5m 4. wait1##10m	Löscht Regelvariablen der Stromkontrolle, Start Verzögerungstimer
U innerhalb Toleranzbereich	U_ok	(Uout.RMS >= (Un * U_tolUnten)) && (wait == 1) && (Iph > 0)	Übergang zu I_init bei: 1. Ausgangsspannung größer Mindestwert 2. Ablauf der Verzögerung 3. aktivem Phasenschieberbetrieb
	Siehe „innerer Kreis“	-	-
	U_nicht_OK	(Uout.RMS < (Un * U_tolUnten))	Rückkehr zu U_init bei: Ausgangsspannung kleiner als Mindestgröße
U außerhalb Toleranzbereich	U_klein	((Uout.RMS <= (Un * U_tolUnten)) (Uout.RMS > (U_tolOben * Un))) && (Iph > 0.001) && (wait == 1) && Reglerfreigabe	Eingang bei: 1. Ausgangsspannung außerhalb des Toleranzbereiches 2. aktivem Phasenschieberbetrieb 3. Ablauf der Verzögerung 4. freigegebener Regelung
	I_Verringern2	1. S_Huelle = RN1.I * PKWmax 2. URDiff = Uout.RMS - Un 3. URDiff2 = URDiff2 + UR-	Reduziert den Stromwert der Stromquelle anhand der Spannungsdifferenz, Start Verzögerungstimer

		$\text{Diff} * I_{\text{Faktor}}$ 4. $I_{\text{Regler}} = I_{\text{Regler}} + \text{URDiff} * P_{\text{Faktor}} + \text{URDiff2}$ 5. wait##10m	
	TRANS11	wait == 1	Rückkehr zu U_init bei: Ablauf der Verzögerung
U bypass	U_bypass	$((I_{\text{ph}} < 0.001) \ \ $ $(I_{\text{Regler}} < 0.001)) \ \&\&$ $(\text{wait1} == 1 \)$	Eingang bei: 1. inaktivem Phasenschieberbetrieb 2. Ablauf der Verzögerung
	Warteposition_U	1. $\text{SRDiff} = 0$ 2. $\text{SRDiff2} = 0$ 3. $\text{URDiff} = 0$ 4. $\text{URDiff2} = 0$	Löschen aller Regelvariablen
	TRANS3	$I_{\text{ph}} > 0.001$	Rückkehr zu U_init bei: Aktivem Phasenschieberbetrieb

Tabelle 9 Erklärung Zustandsgraph „I_KW“ - äußerer Kreis

	Bezeichnung	Inhalt	Beschreibung
Beginn	I_init	1. $S_{\text{tmp}} = U_{\text{out.RMS}} * I_{\text{out.RMS}}$ 2. $S_{\text{Huelle}} = PKW_{\text{max}} * R_{N1.I}$ 3. $\text{URDiff} = 0$ 4. $\text{URDiff2} = 0$ 5. wait##10m 6. wait1##20m	Aktualisiert Leistungsabgabe und -grenze, Löscht Regelvariablen der Spannungskontrolle, Start Verzögerungstimer

Leistungsbegrenzung	S_gross	<pre> (S_tmp > (S_Huelle * S_tolOben)) && (Uout.RMS >= (Un * U_tolUnten)) && (wait == 1) && Reglerfreigabe </pre>	<p>Eingang bei:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Überschreitung der Leistungsgrenze 2. Einhalten einer Mindestspannung 3. Ablauf der Verzögerung 4. freigegebenem Phasenschieber
	I_Verringern	<pre> 1. S_Huelle = PKWmax * RN1.I 2. SRDiff = (S_Huelle - (Uout.RMS * Iout.RMS)) / Un 3. SRDiff2 = SRDiff2 + SRDiff * I_Faktor 4. I_Regler = I_Regler + SRDiff * P_Faktor + SRDiff2 5. wait##10m </pre>	<p>Reduziert Stromwert der Stromquelle anhand der Leistungsdifferenz,</p> <p>Start Verzögerungstimer</p>
	TRANS2	wait == 1	Ausgang
Reduzierung Stromwert	Iph_kleiner_I	<pre> (Iout.RMS > (1.02 * Iph)) && (wait == 1) && Reglerfreigabe </pre>	<p>Eingang bei:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Stromvorgabewert kleiner als aktueller Stromwert der Quelle 2. Ablauf der Verzögerung 3. freigegebenen Phasenschieber
	I_Verringern1	<pre> 1. SRDiff = Iph - Iout.RMS 2. SRDiff2 = SRDiff2 + SRDiff * I_Faktor 3. I_Regler = I_Regler + SRDiff * P_Faktor + SRDiff2 </pre>	<p>Reduziert Stromwert der Quelle anhand Stromdifferenz, Löscht Regelgrößen der Spannungs kontrolle,</p> <p>Start Verzögerungstimer</p>

		4. URDiff = 0 5. URDiff2 = 0 6. wait##10m	
	TRANS4	wait == 1	Ausgang
Erhöhung Stromwert	I_klein	(Iout.RMS < Iph) && (S_tmp < (S_Huelle * S_tolUnten)) && (Uout.RMS >= (Un * U_tolUnten)) && (wait == 1) && Reglerfreigabe	Eingang bei: 1. Stromvorgabewert größer als aktueller Stromwert 2. Leistungs kleiner als Maximum 3. Spannung größer als Mindestwert 4. abgelaufener Verzögerung 5. freigegebenem Regler
	I_Vergroessern	1. S_Huelle = PKWmax * RN1.I 2. SRDiff = (S_Huelle - (Uout.RMS * Iout.RMS)) / Un 3. SRDiff2 = SRDiff2 + SRDiff * I_Faktor 4. I_Regler = I_Regler + SRDiff * P_Faktor + SRDiff2 5. wait##10m	Erhöhung des Phasenschieberstromes anhand der Leistungsdifferenz, Start Verzögerung
	TRANS6	wait == 1	Ausgang
Ausgeregelt	S_bypass	wait1 == 1	Eingang
	Warteposition_I	1. S_tmp = Uout.RMS * Iout.RMS 2. S_Huelle = PKWmax * RN1.I	Einlesen von Leistungsgrenze und aktueller Leistungsabgabe, Rücksetzen der Regler-

		3. SRDiff = 0 4. SRDiff2 = 0 5. URDiff = 0 6. URDiff2 = 0	variablen
	TRANS1	(S_tmp > (S_Huelle * S_tolOben)) (Uout.RMS < (Un * U_tolUnten)) (Iph < (0.98 * Iout.RMS)) (Iph > (1.02 * Iout.RMS))	Ausgang bei: 1. Überschreiten der Grenzleistung oder 2. Unterschreiten der Mindestspannung 3. Änderung des Vorga- bestromes
Übergang	STATE6	-	Eingang
	U_ok1	(Uout.RMS >= (Un * U_tolUnten)) && (Iph > 0.001)	Rückkehr zu I_init bei: 1. Spannung oberhalb Mindestwert, 2. aktivem Phasen- schieber
	U_nicht_OK	Uout.RMS < (Un * U_tolUnten))	Rückkehr zu U_init bei: Unterschreiten der Mindestspannung

Tabelle 10 Erklärung Zustandsgraph „I_KW“ - innerer Kreis

Zum Abschluss dieses Kapitel wird anhand von vier Diagrammen die Funktion des Phasenschiebers demonstriert. Der Aufbau zeigt neben dem Phasenschiebermodul auch das Spannungsreglermodul und zwei diskrete Elemente zur Simulation eines ohmisch-induktiven Verbrauchers. Dieser Aufbau ist notwendig, da der Phasenschieber keine Spannung vorgeben kann. Die zwei t-y-Tabellen „phi „ (Verschiebungswinkel) und „Iph“ (Phasenschieberstrom) beinhalten die Vorgabewerte für den Phasenschieber. Das Messgerät „MM_Last“ berechnet die Effektivwerte.

Die Werte der Lastelemente, der Phasenschieberstrom und die Nennspannung bleiben über die gesamte Simulationsdauer konstant. Nur der Phasenwinkel von I_KW ändert sich

von anfänglich -90° über 0° zu $+90^\circ$. Dies bewirkt dass sich beide Subsysteme, U_{KW} und I_{KW} , je nach Phasenwinkel des Phasenschiebermoduls die Leistung der Last unterschiedlich aufteilen.

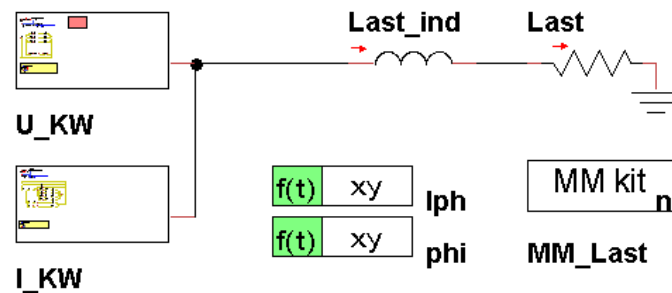


Abbildung 27 Aufbau zur Demonstration „I_KW“

Abbildung 28 zeigt wie die Wirkleistung zu Beginn vollständig von U_{KW} getragen wird. Während der Simulation übernimmt das I_{KW} immer mehr Wirkleistung. Bis es bei 0° Phasenverschiebung (circa 11s) nur noch Wirkleistung abgibt. Danach übernimmt es auf Kosten der Wirkleistungsabgabe, wieder mehr Blindleistung.

Abbildung 29 zeigt hierzu den Verlauf der Blindleistung. Zu Beginn addieren sich sogar der Blindleistungsbedarf der Last und die eingespeiste Blindleistung des I_{KW} . Wie bei der Wirkleistung schon erwähnt, durchquert die Blindleistungskurve bei circa 11s den Nullpunkt. Danach entlastet der Phasenschieber das U_{KW} immer mehr. Bis es am Schluss die gesamte Blindleistung alleine trägt.

Der Stromverlauf verdeutlicht noch einmal, dass sich der Strom des I_{KW} nicht verändert, und der U_{KW} – Strom sich an die Verhältnisse anpasst.

Zum Schluss soll Abbildung 31 die gemessenen Phasenverschiebungen von Last, U_{KW} und I_{KW} darlegen. Es ist zu erkennen wie der Phasenschieber seinem Vorgabewert folgt. Da das U_{KW} insgesamt immer mehr Leistung als das I_{KW} an die Last abführt, wird es von der Phasenverschiebung beeinflusst, aber vollständig geführt. Die Last verändert ihre Phasenlage nicht, da die bezogene Leistung konstant bleibt. Das alternieren der Kurven zwischen den Werten ± 1 ist dem Messgerät zuzuordnen. Dieser Fehler deutet nur darauf hin, dass dieses Modul nur Wirkleistung abgibt.

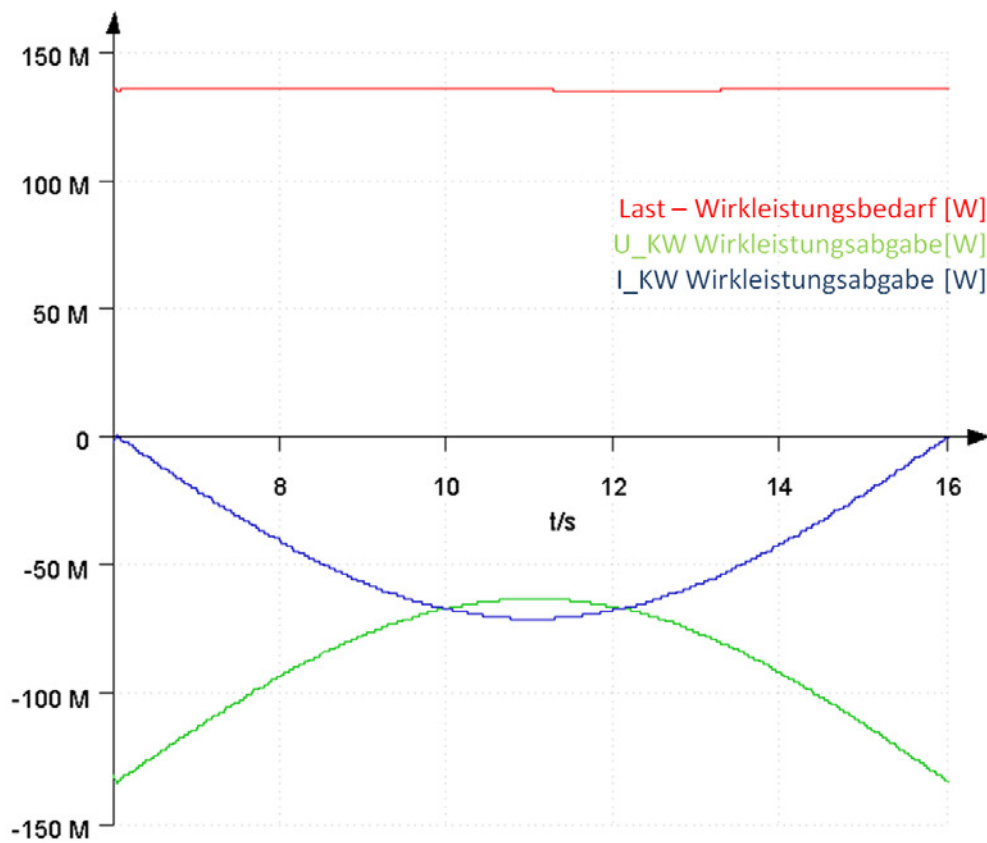


Abbildung 28 Demonstration „I_KW“ Wirkleistung

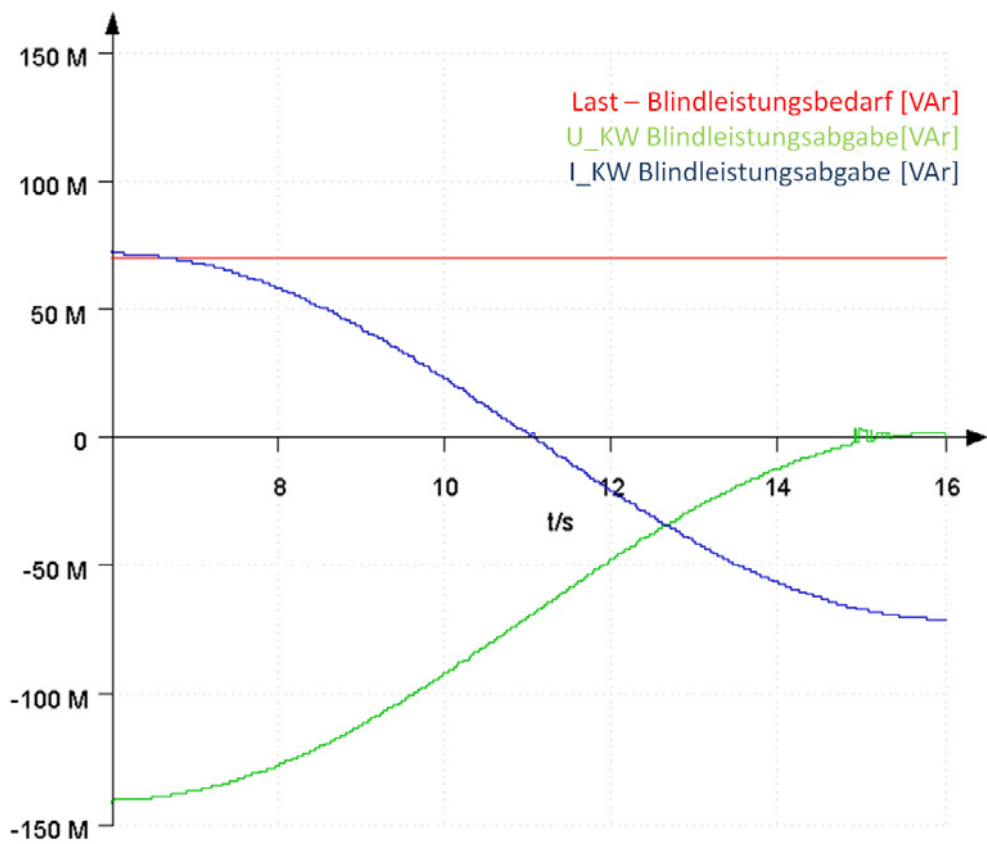


Abbildung 29 Demonstration „I_KW“ Blindleistung

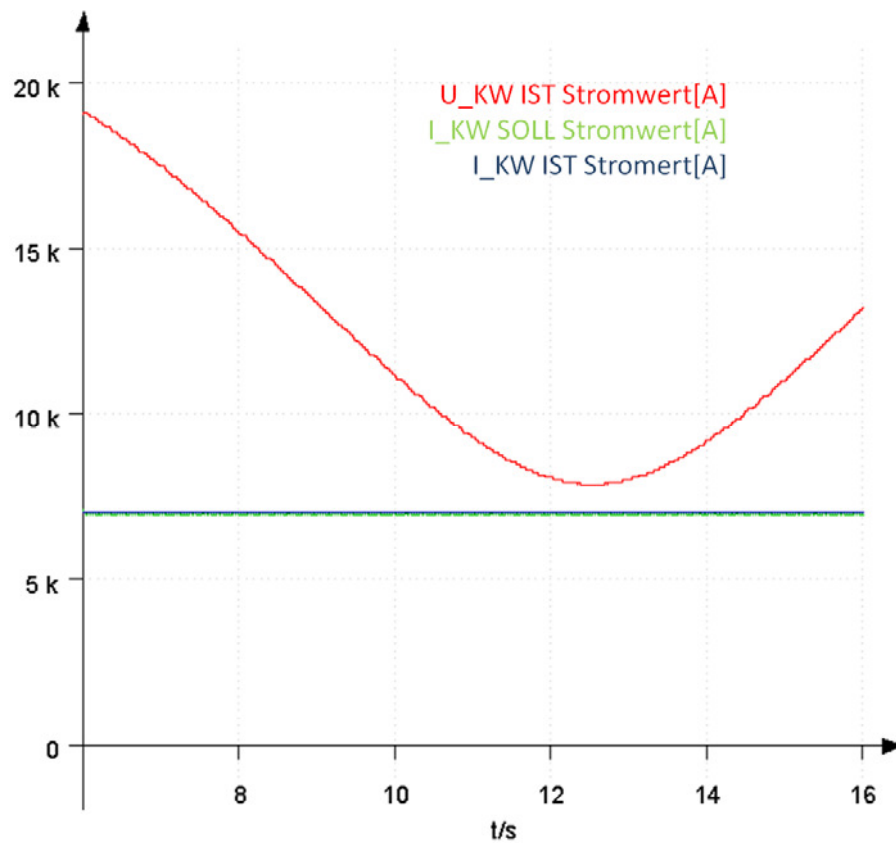


Abbildung 30 Demonstration „I_KW“ Phasenstrom

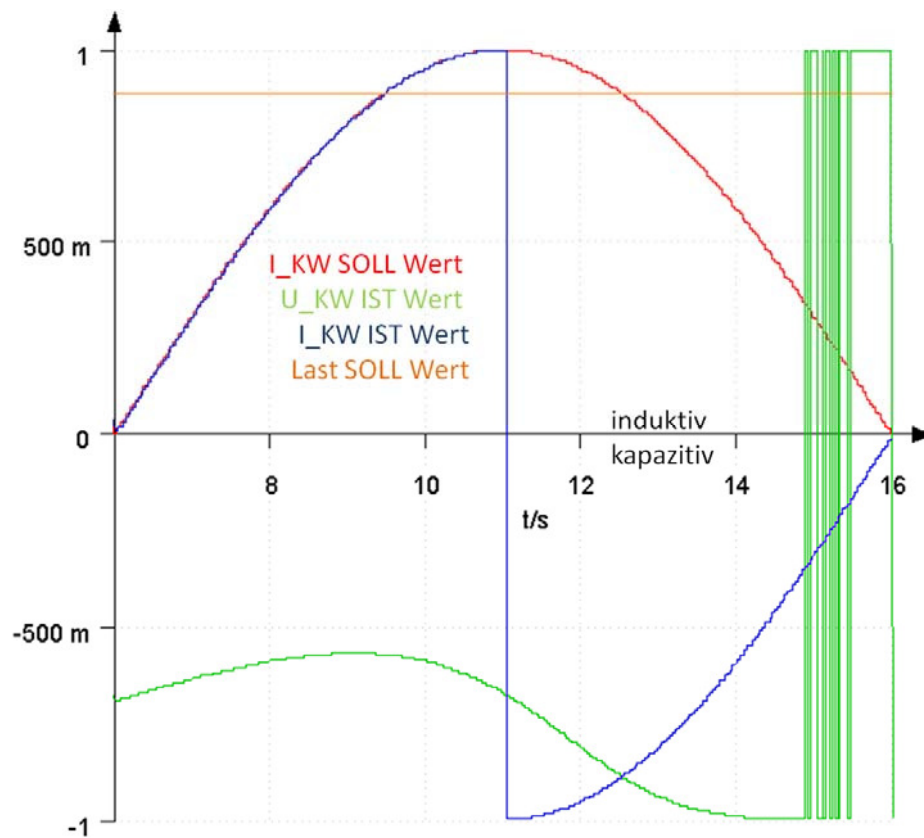


Abbildung 31 Demonstration „I_KW“ Phasenverschiebung in $[\cos(\Phi)]$

Fazit, der Phasenschieber kann das Spannungsreglermodul U_KW unterstützen und gezielt bestimmte Anteile der Leistungsabgabe übernehmen. Es trägt somit zur Stabilisie-

rung des Energienetzes mit bei. Die Funktion der Leistungsbegrenzung wurde nicht mit demonstriert, da es eine analoge Umsetzung wie im U_KW ist.

1.4 Messgerät

Portunus hält in seiner Standardbibliothek für den einphasigen Betrieb nur Modelle zur direkten Ausgabe der Augenblickswerte bereit. Diese sind zur Beurteilung und Auswertung von transienten Vorgängen in kleinen Netzwerken ausreichend. Zur Steuerung und Regelung mittlerer und großer Netze, deren Zustände voneinander abhängen und durch Zustandsgraphen gesteuert werden können, sind die Augenblickswerte nicht aussagekräftig genug. Darum wurden im Vorfeld mehrere Varianten untersucht und in einer gesonderten Bibliothek Modelle gespeichert. Diese Messgeräte ermitteln im 20ms Takt alle relevanten Effektivwerte, sowie die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung. Die Validierung und die Genauigkeit dieser Berechnungen erfolgt in [MeyNi12].

Zur flexibleren Verwendung wurde Variante 1 dieses Messgerätes von dem Netzwerkmodell in ein Blockmodell umgewandelt. Die Eingangsparameter sind die Augenblickswerte $i(t)$, $u(t)$ und $p(t)$. Da das Standardmodell des einphasigen Multimeters nur einen geringen Rechenaufwand bedeutet, kann dies in alle Netzmodelle implementiert oder an mehrere Stellen im gesamten Netzwerk hinzugefügt werden. Durch einfache Zuordnung der Augenblickswerte wird somit die Anzahl der rechenintensiveren Messgeräte reduziert und ermöglicht ein unkompliziertes Umsetzen des Messpunktes.

2 Simulationsergebnisse

2.1 Spannungstoleranz

Der Spannungsregler besitzt ein Toleranzband. Die Grenzen dieses Bandes werden über einen Übertragungsparameter und zwei interne Variablen errechnet (siehe Tabelle 11). Die Grenzwerte steuern mit weiteren Bedingungen die Übergänge der einzelnen Zweige des Zustandsgraphen (Tabelle 8). Und sind somit maßgebend für die Arbeitsweise des Reglers. So wird bei Unterspannung der Spannungswert bis mindestens zum unteren Grenzwert angehoben und bei Überspannung auf höchstens den oberen Grenzwert abgesenkt. Anders ausgedrückt, arbeitet der Regler solange bis der Spannungswert innerhalb des Toleranzbandes liegt. Achtung, die Spannungsregelung ist der Leistungsbegrenzung untergeordnet. So kann es passieren das eine Unterspannung vorherrscht, und der Spannungswert konstant bleibt oder sogar noch weiter fällt.

	Subsheet des Kraftwerkes Kapitel 1.3.2 bzw. [MeyNi12]	Spannungsreglermodul Kapitel 1.3.3
Bezeichnung des Idealwertes (Übertragungsparameter)	Uln (Amplitude der Phasenspannung) standardmäßig bei 14.14kV	Un (Effektivwert der Phasenspannung) standardmäßig bei 10kV
Bezeichnung des Faktors für den oberen Grenzwertes (interne Variable)	ObereSpannungsbegrenzung standardmäßig bei 1.1	U_tolOben standardmäßig bei 1,02
Bezeichnung des Faktors für den unteren Grenzwertes (interne Variable)	UntereSpannungsbegrenzung standardmäßig bei 0.9	U_tolUnten standardmäßig bei 0,98

Tabelle 11 Variablen des Spannungstoleranzbandes

2.2 Scheinleistungsbegrenzung

Eine Einleitung zum Thema Leistungsbegrenzung findet sich im Kapitel 1.3.1. Die Vorgaben welche Blind- und Wirkleistungen ein Kraftwerk anfahren können muss, wird durch den Übertragungsnetzbetreiber auf Grundlage der Netzverhältnisse in Verbindung mit einigen Richtlinien wie zum Beispiel TransmissionCode 2007, Distribution Code 2007 und Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz 2008 festgelegt. Die gesetzlichen Vorgaben dieser Richtlinien ist den Einleitungen der jeweiligen Richtlinie zu entnehmen. Nach diesen Vorgaben werden dann Kraftwerksblöcke oder auch Generatoren (zum Beispiel bei Windkraftanlagen) ausgelegt und geprüft [TW11].

Bei der Darstellung der Funktionsweise der Leistungsbegrenzung wird hinter dem Leistungsmodell ein Verbraucher an das Spannungsreglermodul angekoppelt (Abbildung 32). Das Messgerät „MM kit“ ermittelt seine Ausgaben anhand von Strom und Spannung des Multimeters. Im folgendem werden drei Diagramme die Verläufe der Schein-, Wirk- und Blindleistung, sowie der Phasenspannung zeigen. Zu erst wird auf die Einstellung der verwendeten Module, sowie der Simulationsumgebung eingegangen.

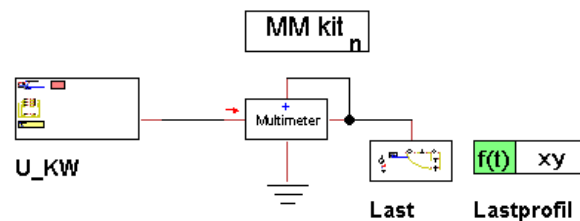


Abbildung 32 Leistungsbegrenzung - Aufbau der Simulation

Der Verbraucher wird durch das Lastmodell realisiert. Zur Erstellung der Wirkleistungstabelle dient der Tageslastgang vom 15.01.2011 von 00:00 Uhr bis 23:45 Uhr des Standard Lastprofils der Haushalte H0 des Landes Nordrhein-Westfalens (Abbildung 49). Dieses Profil wurde vom BDEW ausgegeben und kann als eine Grundlage zur Anmeldung des Leistungsbedarfs eines Energieversorgers an den Übertragungsnetzbetreiber, sowie im Nachgang für die Ermittlung von Mehr- und Mindermengen genutzt werden. Der $\frac{1}{4}$ h Rhythmus des Lastprofils wird auf $\frac{1}{4}$ s Werte der Tabelle übertragen. Daraus ergibt sich eine simulierte Zeitdauer von mindestens 24s. Ein fester Skalierungsfaktor legt die Leistungswerte fest. Er wurde so gewählt das der Regler binnen 24s einmal seine Grenzleistung erreicht und einmal seine Grenzleistung überschreitet. Zum Vergleich des Blindleistungseinflusses werden zwei Simulationsdurchläufe miteinander verglichen. Der erste Lauf mit 200Mvar und der zweite Lauf mit -40Mvar. Wie aus Abbildung 15 Leistungsdiagramm eines 500MW Generators des Kraftwerkes Jähnschwalde zu entnehmen ist, kann der Generator bei diesen Blindleistungsvorgaben noch seine maximale Wirkleistung von 550MW abgeben.

Da alle bearbeiteten Modelle das gleiche Prinzip der Leistungsbegrenzung verwenden, wurde zur Minimierung von möglichen Fehlern das Spannungsreglermodul eingesetzt. Von den drei bearbeiteten Erzeugermodellen besitzt es die einfachste Regelstruktur. Die Vorgabewerte sind:

- Generatorresistanz: $0.1 \text{ m}\Omega$ ⁶
- Generatorreaktanzen: $0.1 \text{ m}\Omega$
- Leistungsdiagramm: 500MW Generator von Jähnschwalde
- Bemessungsleistung: 500MW
- Anfangsspannung: 10kV

Die Simulationseinstellungen bleiben bis auf die kleinste Iterationsschrittweite und die simulierte Zeitdauer unberührt. Die kleinste Schrittweite wird auf 10^{-4} reduziert und die Zeit auf 24 Sekunden festgelegt.

Es folgt der erste Simulationsdurchlauf mit einer Blindleistungsabgabe von 200MVar.

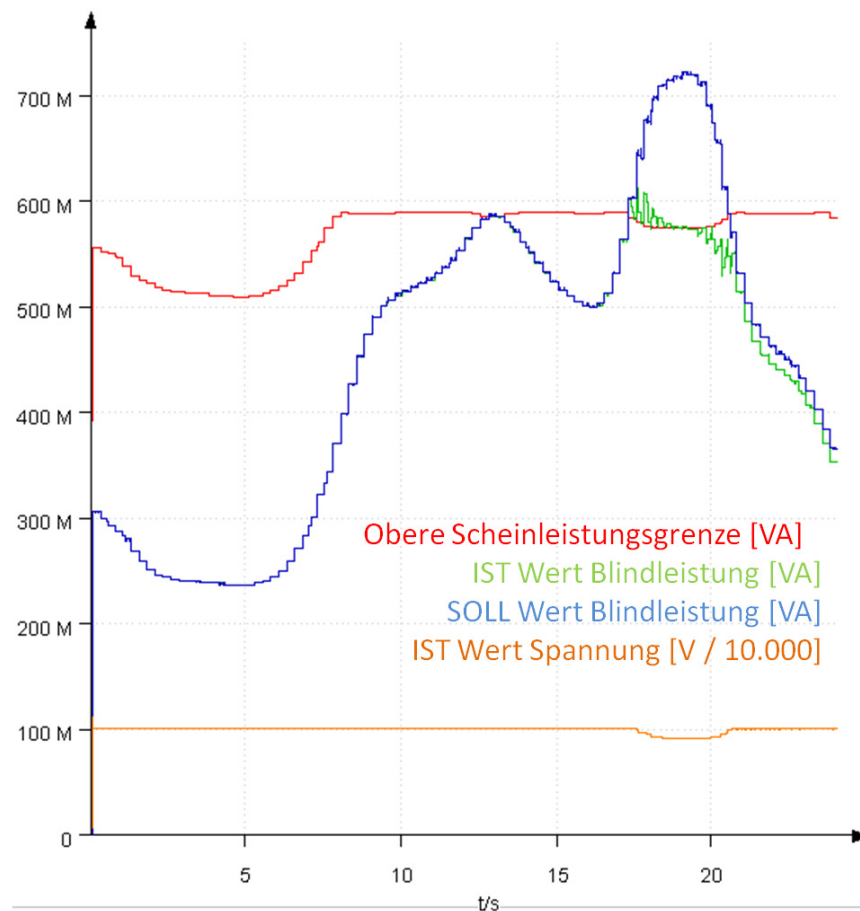


Abbildung 33 Scheinleistungsverlauf ($Q = 200 \text{ MVar}$)

⁶ Größere Resistanz und Reaktanzwerte erzeugten zum Teil sichtbare Spannungsabfälle innerhalb des Generators

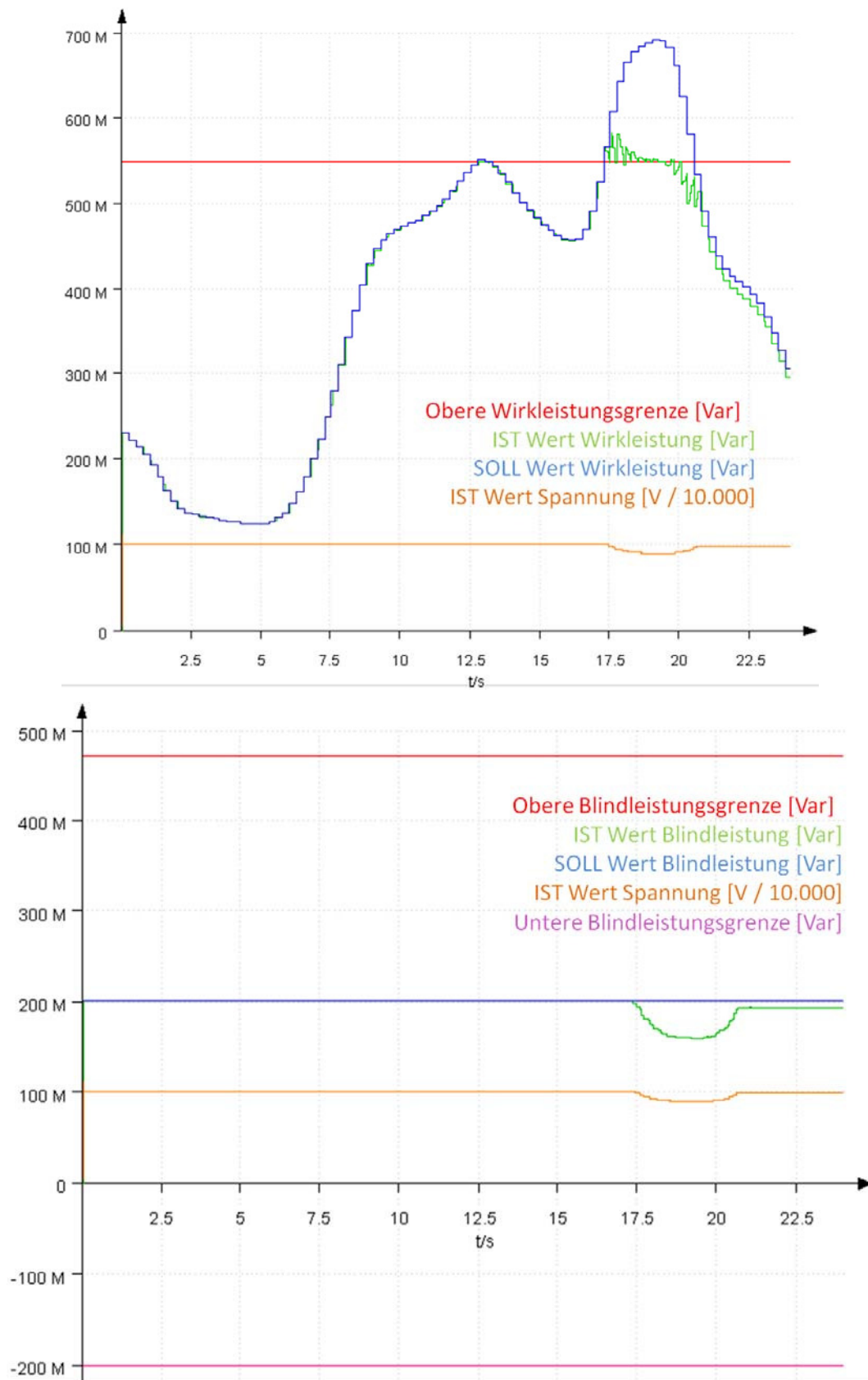


Abbildung 34 Wirk- und Blindleistungsverlauf ($Q = 200\text{MVar}$)

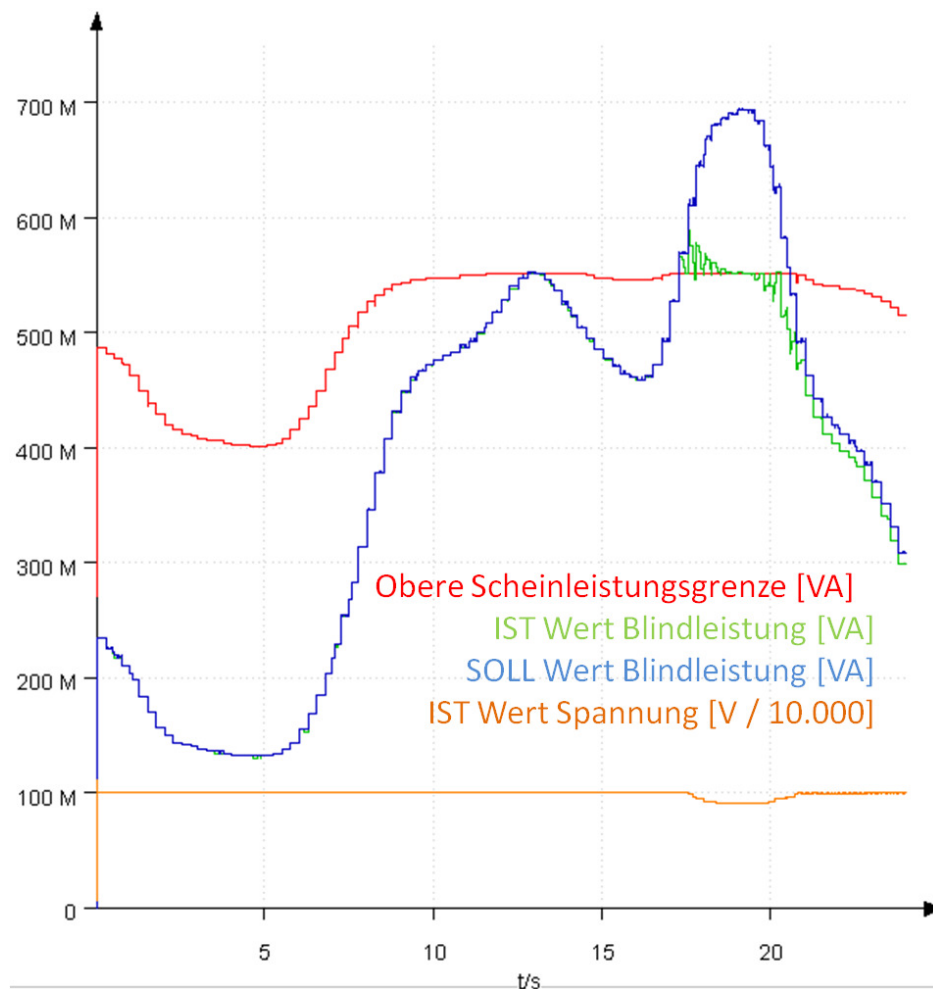


Abbildung 35 Scheinleistungsverlauf ($Q = -40\text{MVar}$)

Wie zu erwarten war, Verhält sich das System in beiden Fällen gleich. Pro Sekunde ändert sich der Leistungswert viermal. Die vorgegebenen Leistungswerte stimmen anfänglich mit den gemessenen überein. Da die aktuelle Spannung gleich der Nennspannung ist. Erst bei Überschreiten der Grenzleistung wird die Spannung reduziert bis das Vergleichskriterium „Verbrauchszeiger kleiner gleich Leistungsgrenzzeiger“ wieder zutrifft. Da der Spannungsregler schnell reagiert und nur eine geringe Neigung zum Schwingen hat, regelt er die Spannungsabweichung in wenigen hundert Millisekunden aus. Mit Rückgang des Wirkleistungsbedarfs ab circa 19.5s, verkleinert sich der Verbrauchszeiger mit jedem neuen Vorgabewert. Als Folge kann die Spannung bis zum Erreichen der Leistungsgrenze wieder angehoben werden. Aufgrund des Toleranzbandes des Spannungsreglers (Kapitel 2.1), fängt sich der Spannungsregler bei 98% der Nennspannung. Als Folge weichen die gemessenen von den vorgegebenen Leistungswerten nun ab.

Abbildung 35 und Abbildung 36 zeigen den zweiten Durchlauf mit einer Blindleistungsabgabe von -40MVar . Dieser Durchlauf zeigt ein vergleichbares Verhalten des Spannungsreglermoduls.

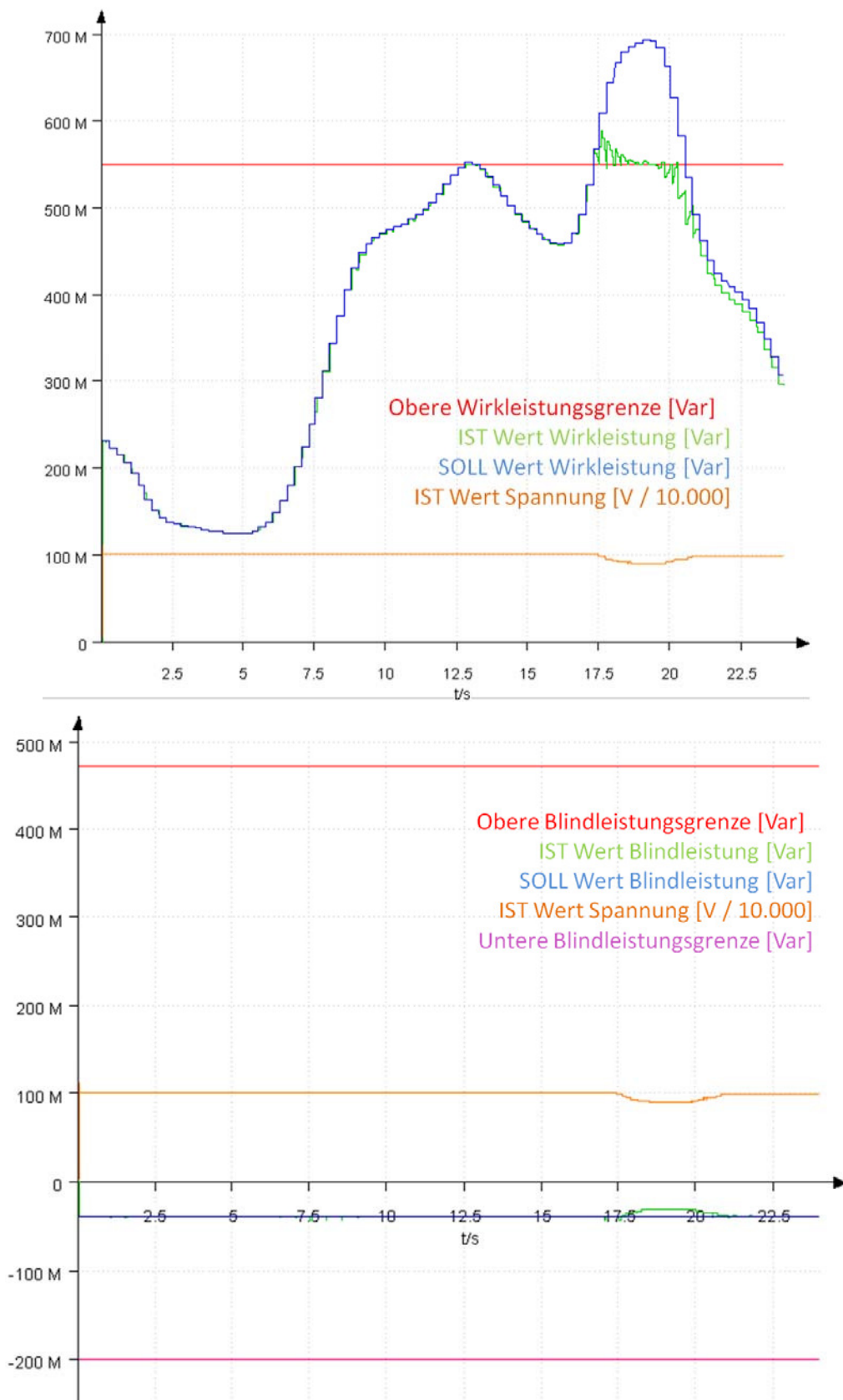


Abbildung 36 Wirk- und Blindleistungsverlauf ($Q = -40\text{MVar}$)

Fazit, die Leistungsbegrenzung des Spannungsreglermoduls arbeitet wie erwartet. Die Spannung bricht ein, sobald die Leistungsgrenze überschritten ist. Die maximale Blindleistungsabgabe wird durch die Generatorkennlinie Abbildung 15 vorgegeben. Und ist da-

durch auch an andere Generatormodelle anpassbar. Der Demonstration der Leistungsbegrenzung des Kraftwerk Subsheets und des I_KWs entfallen, da deren Regler identisch ist.

2.3 Phasenschieberbetrieb

Da der Wandel des Energienetzes mit dem Wegfall großer Stromerzeuger instabiler wird, müssen auch kleinere Kraftwerke sich an den Netzdienstleistung beteiligen. Eines dieser Dienste ist die Bereitstellung von Blindleistung. Energetisch betrachtet ist dies sogar eine effizientere Lösung, da hierdurch die benötigte Blindleistung lokal bereit gestellt wird. Somit reduziert sich die zusätzliche Belastung durch Blindstrom im Übertragungsnetz. Dezentrale regenerative Stromerzeuger sind in der Lage die Phasenlage von Strom und Spannung so zu verschieben, dass sie eine definierte Blindleistung abgeben können.

Der Phasenschieberbetrieb wird durch das Phasenschiebermodul „I_KW“ (Kapitel 1.3.4) ermöglicht. Zusätzlich zur Demonstration der Funktionsweise am Ende des Kapitel 1.3.4, sollen im folgendem drei weitere Beispiele gezeigt werden.

- Kompensation einer lastbedingten Blindleistung (Abbildung 37)
- Kompensation eines Kabels (Abbildung 41)
- Kompensation einer Freileitung (Abbildung 45)

Die Einstellungen von Portunus entsprechen, bis auf die minimale Iterationsschrittweite ($HMIN = 10^{-4}$) und der simulierten Zeitdauer ($TEND = 16s$), den Standardeinstellungen.

Das Spannungsreglermodul wird mit 10kV initialisiert und wird in der 10kV – Netzebene arbeiten. Die Bemessungsleistung ist 500MW und unterliegt der Leistungskurve von Abbildung 15. Die restlichen Werte entsprechen den Standardwerten.

Das Phasenschiebermodul wird über zwei Tabellen gesteuert. Eine gibt den Phasenstrom „Iph“ (feste Werte) und die andere die Phasenverschiebung „phi“ (interpolierte Werte) vor. Die situationsabhängige Ausgabegröße der Tabellen, sowie der Änderungszeitpunkte werden je nach Beispiel angepasst. Die restlichen Werte entsprechen den Standardeinstellungen. Das verwendete Generatorleistungsdiagramm ist mit dem des Spannungsreglers identisch.

Das verwendete Leitungsmodell wird durch die Übergabeparameter (Tabelle 12) auf den jeweiligen Leitungstyp und Verlegeart eingestellt. Da in diesem Abschnitt nicht der Leistungsverlust untersucht wird, ist die Länge auf 10km und der Parallelitätsfaktor auf 350 festgelegt. Hierdurch soll auch der spezielle Charakter (Kapitel 1.2) der verwendeten Leitung verdeutlicht werden.

	Freileitung 20kV Al/St 95/15		Kabel NA2XS2Y 3x1x150/16	
Quelle	Cerberus	EnviaM	Cerberus	EnviaM
Spannungsebene [kV]	10	20	6/10	20
Zulässige Dauerstrombelastbarkeit [A]	350	350	316	320
Widerstandsbelag [Ohm / km]	0.306	0.306	0.211	0.211
Reaktanzbelag [Ohm / km]	0.362	0.365	0.11435	0.122
Kapazitätsbelag [μF / km]	0.01	0.01	0.374	0.254

Tabelle 12 Leitungsparameter

Um die Auswirkungen von Kabel- und Freileitungssystemen besser hervor zu heben, wird die erste Simulation ohne Leitung erfolgen. Dies soll eine Vergleichsbasis für die gewonnenen Ergebnisse bilden.

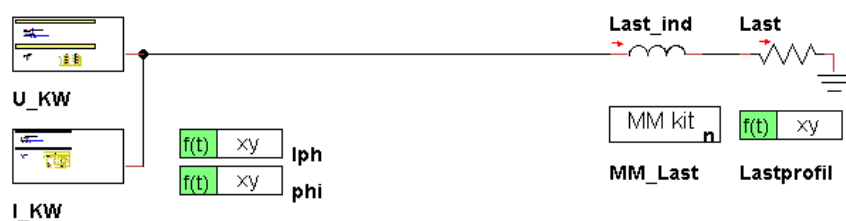


Abbildung 37 Simulationsaufbau ohne Leitungsmodell

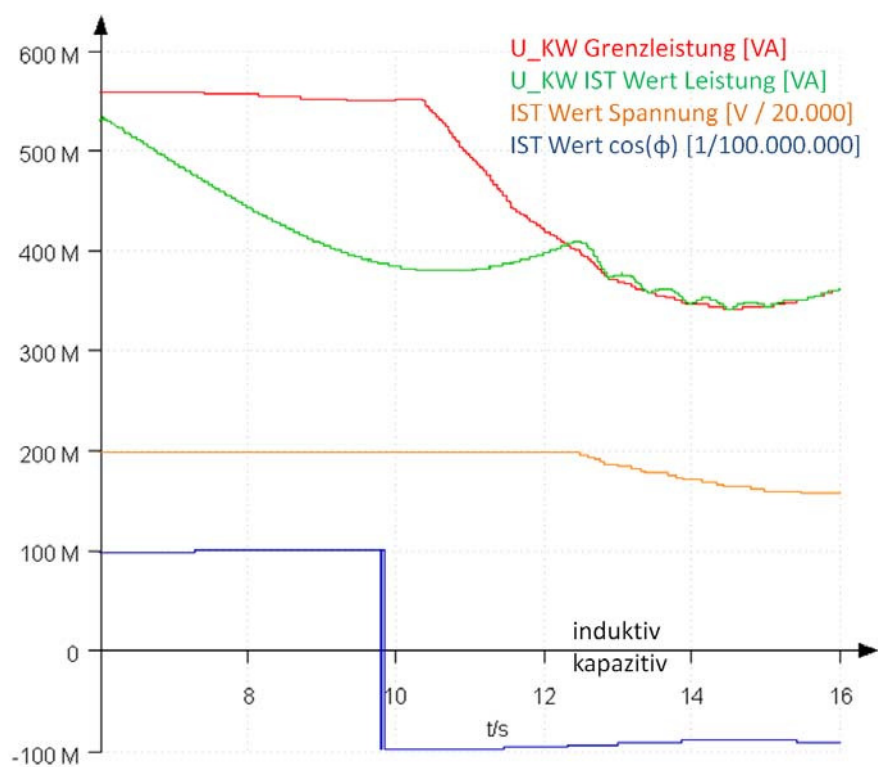


Abbildung 38 U_KW ohne Leitungseinfluss

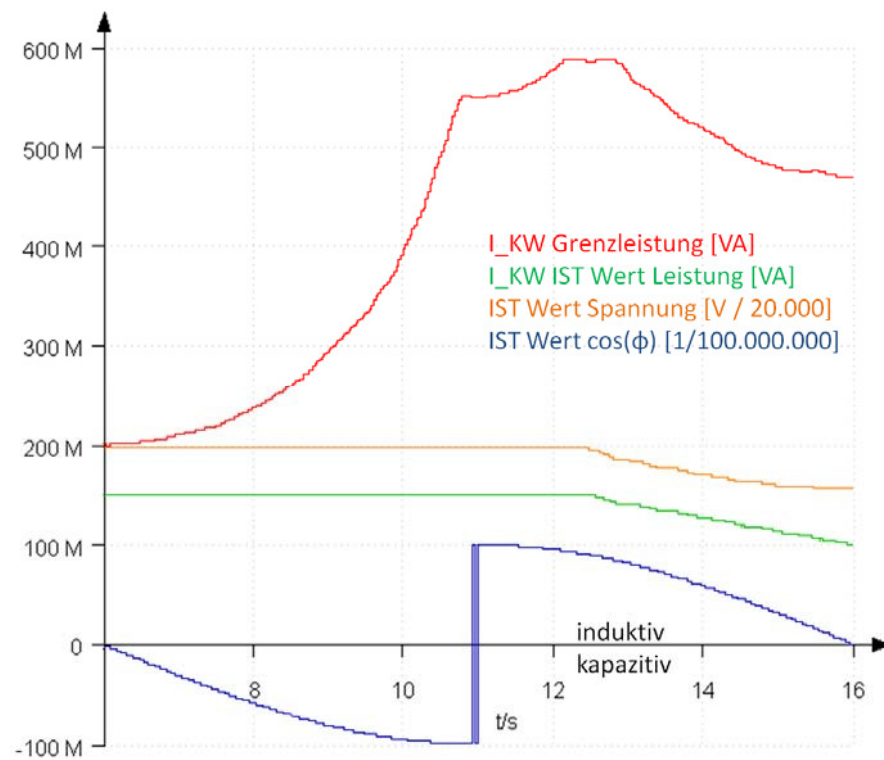


Abbildung 39 I_KW ohne Leitungseinfluss

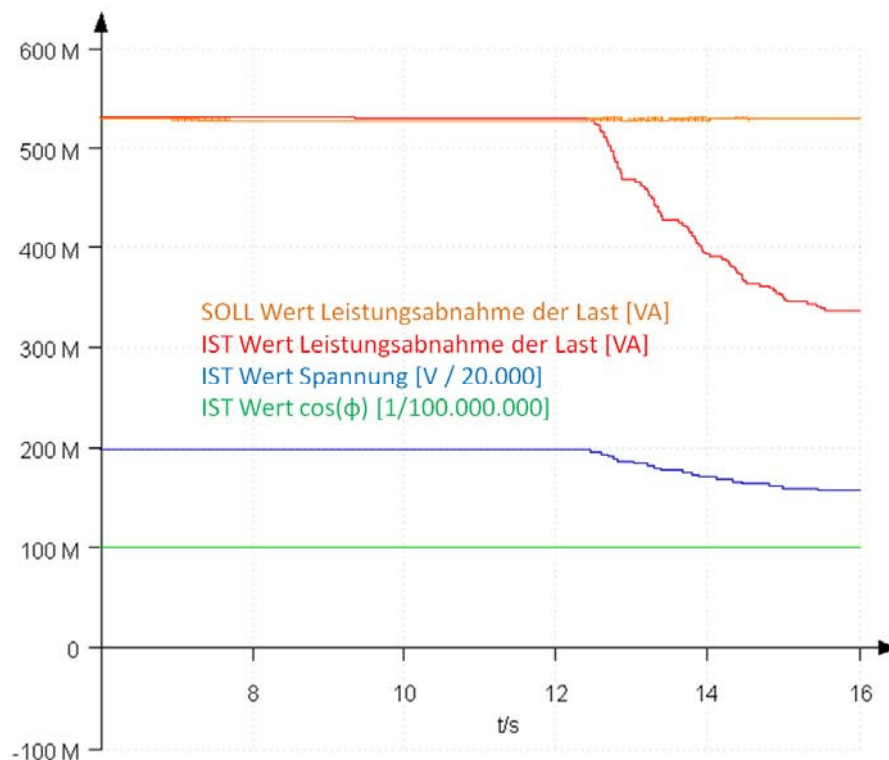


Abbildung 40 Last ohne Leitungseinfluss

Wie auf Abbildung 40 zu erkennen ist, ändert sich weder der Leistungsbedarf noch die Phasenlage der Last. Erst bei Überschreiten der Grenzleistung des U_{KW} , bricht mit der Spannung auf die abgenommen Leistung ein. Das I_{KW} stellt eine konstante Leistung

bereit. Über die gezeigten zehn Sekunden wird aber die Phasenlage von rein kapazitiver Leistungsabgabe über reine Wirkleistungsabgabe zur rein induktiven Leistungsabgabe gefahren. Da die eingestellte Leistungsabgabe immer unterhalb der Grenzleistung ist, wird der Leistungsbegrenzer nicht aktiv. Anders verhält es sich beim U_{KW} . Dieses reagiert auf die Last, sowie der Phasenverschiebung des I_{KW} . Bis zur zwölften Sekunde wird die Phasenverschiebung des U_{KW} zwar beeinflusst, aber nicht so stark das die Leistungsbegrenzung reagiert. Erst danach wird der Generator durch die geforderte Blindleistung der Last, sowie der erzeugten Blindleistung des I_{KW} überlastet und die Spannung bricht ein.

Mit diesem Wissen, wird folgend das Kabel mit einer Länge von 30km und einem Parallelitätsfaktor von 350 simuliert. Dieser Faktor ergibt sich aus der Vorgabe, das das Kabelsystem nur zu 50% ausgelastet sein sollte um unter anderem den Spannungsabfall gering zu halten.

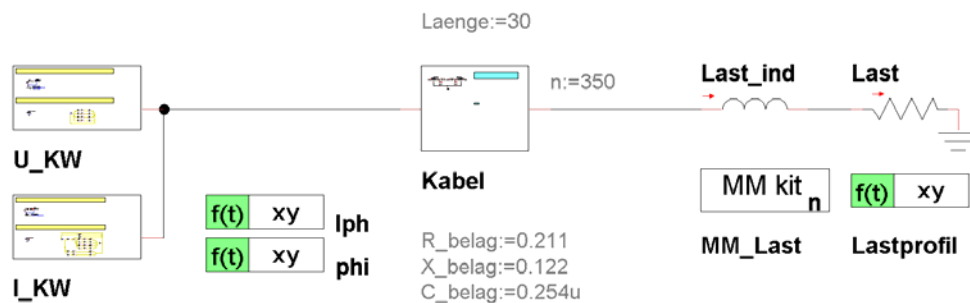


Abbildung 41 Simulationsaufbau mit Kabel

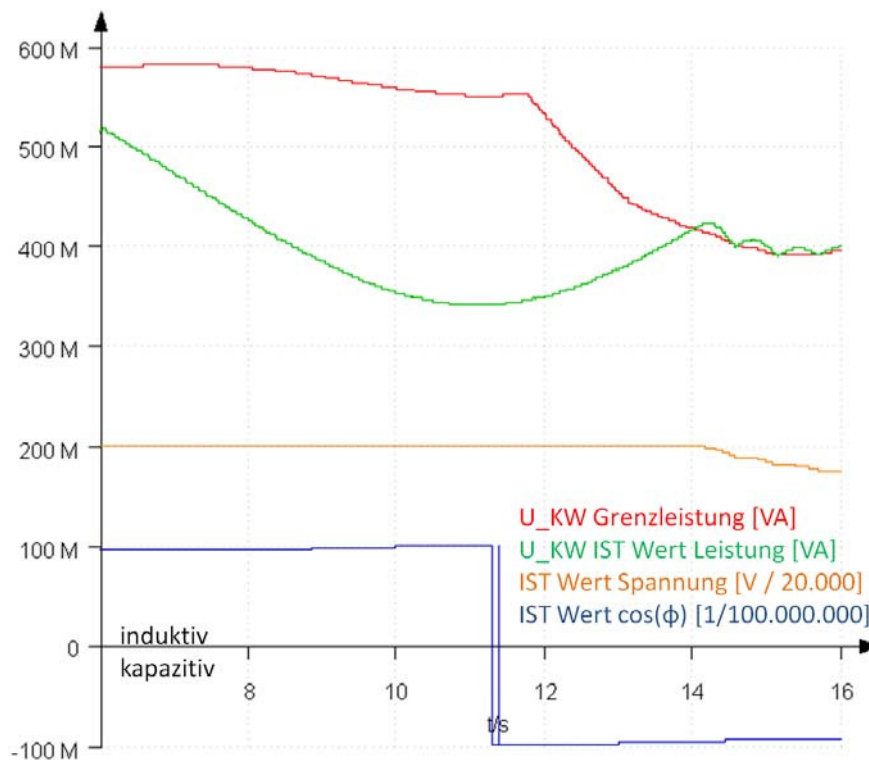


Abbildung 42 U_{KW} mit 30km langem Kabel

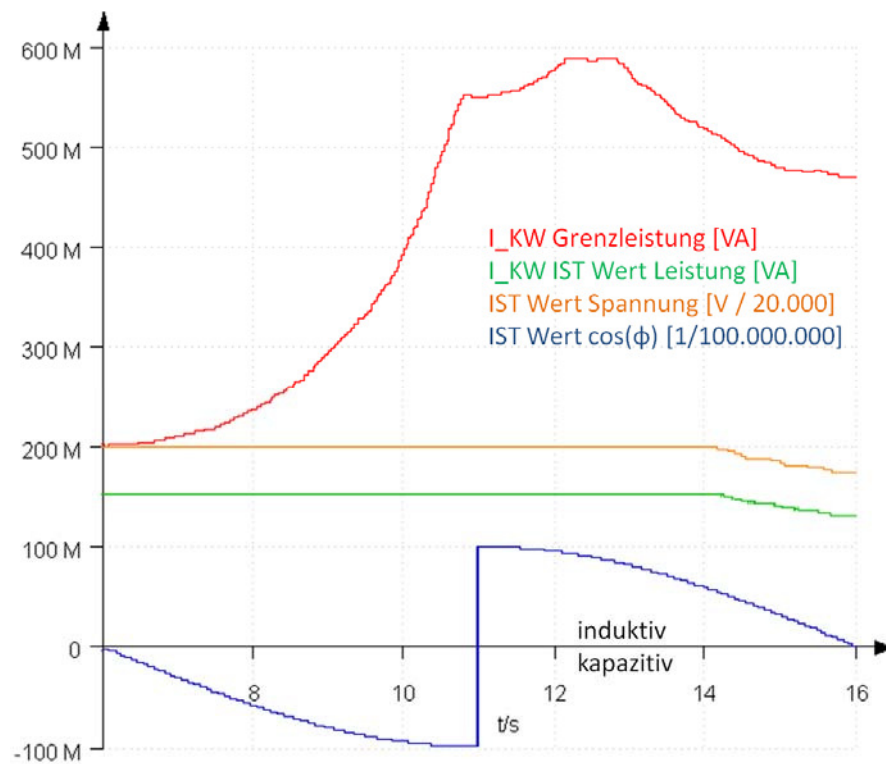


Abbildung 43 I_KW mit 30km langem Kabel

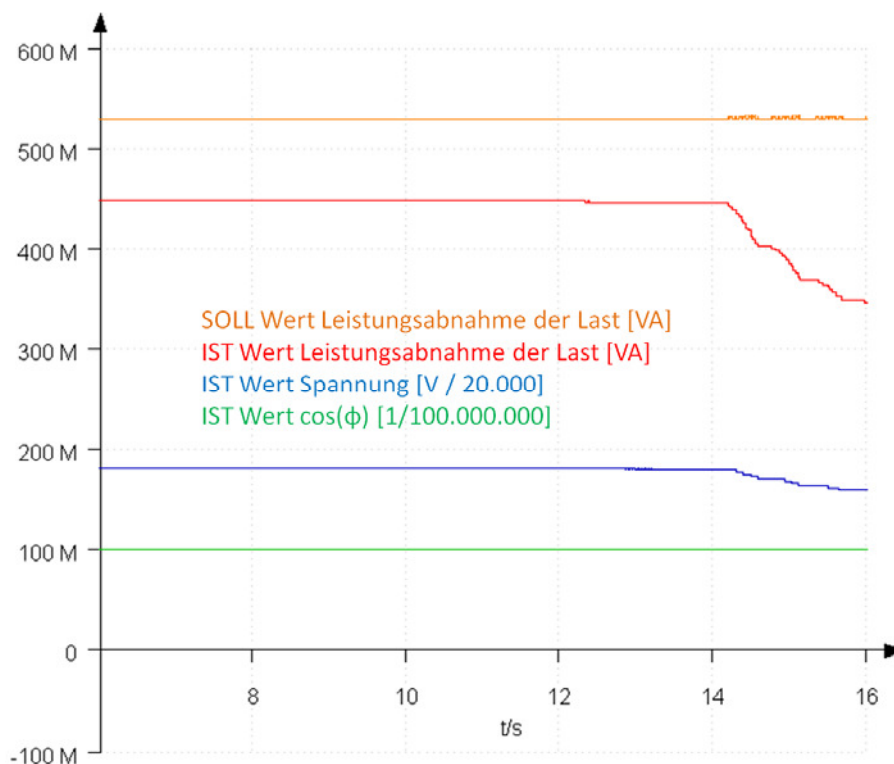


Abbildung 44 Last mit 30km langem Kabel

Dennoch zeigt sich in Abbildung 44 das die Leitung eine Spannungsabfall bewirkt, und somit die abgenommene Leistung geringer ist, als vorgegeben. Jedoch ist der Zeitpunkt des Spannungseinbruches nach hinten verschoben worden. Die Ursache dafür liegt im

Zusammenspiel von I_{KW} , Kabelsystem und U_{KW} . Der schädliche Einfluss des I_{KW} im Bereich zwischen zwölf und vierzehn Sekunden wird durch den kapazitiven Charakter des Kabels kompensiert. Erst danach wird das U_{KW} durch die Blindleistungsforderung überlastet. Wie Abbildung 42 zeigt, nimmt das Kabel in Verbindung mit dem I_{KW} auch schon vorher Einfluss auf die Phasenverschiebung und somit auf die Grenzleistungskurve des Generators.

Folglich wäre bei der Verwendung des Freileitungssystems zu erwarten, dass die Leistungsbegrenzung des U_{KW} früher einsetzt.

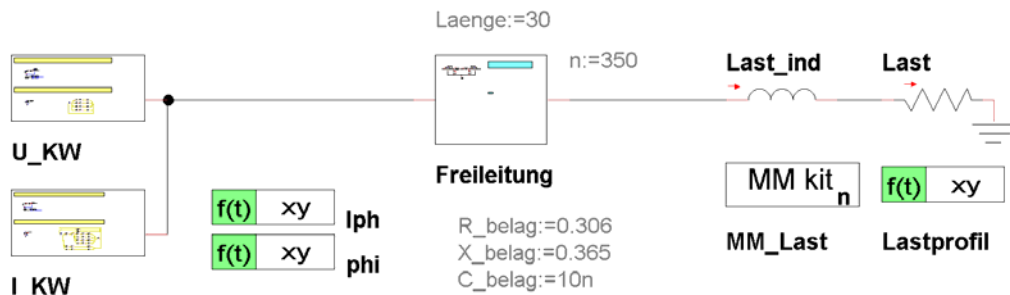


Abbildung 45 Simulationsaufbau mit Freileitung

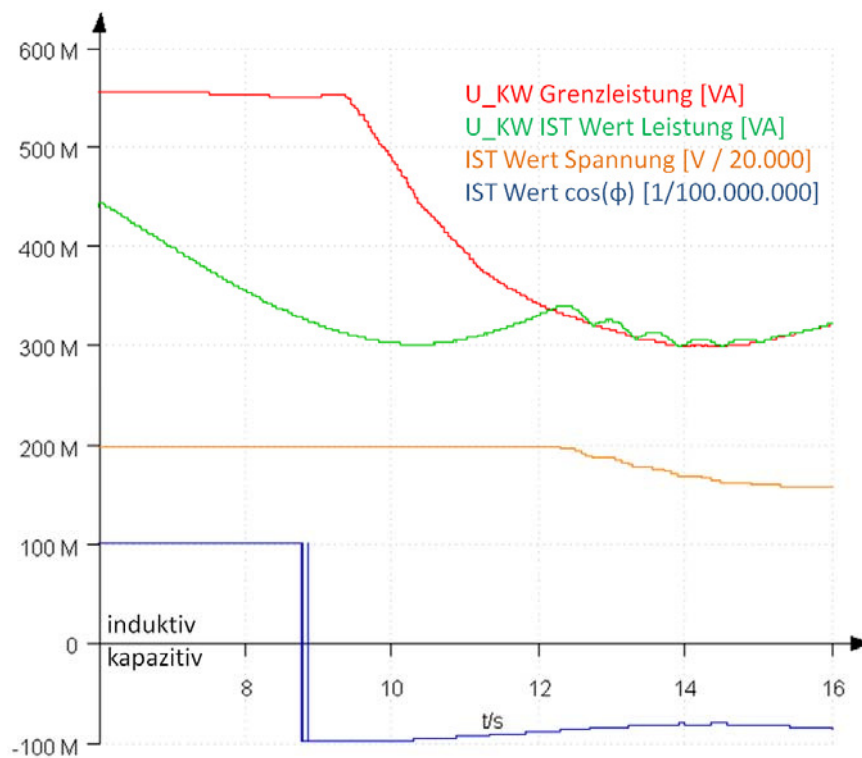


Abbildung 46 U_{KW} mit 30km langer Freileitung

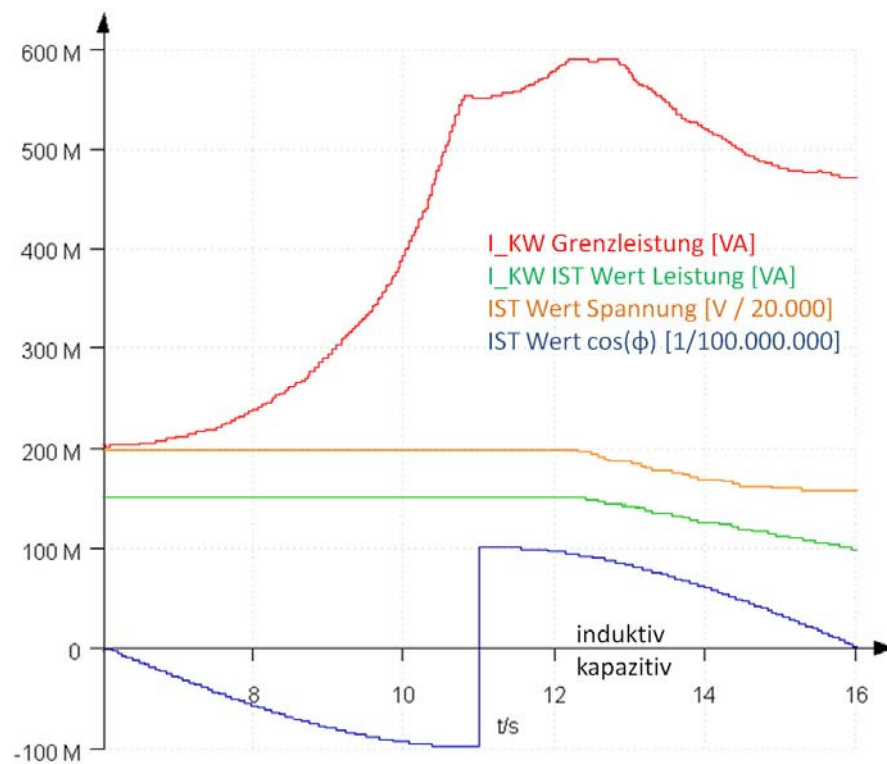


Abbildung 47 I_KW mit 30km langer Freileitung

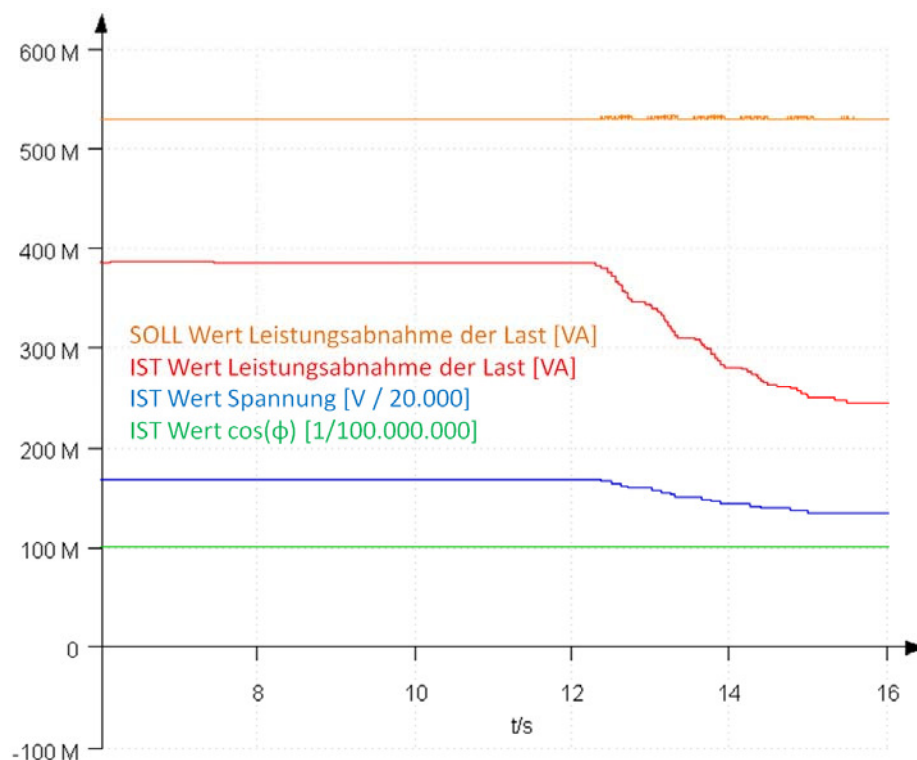


Abbildung 48 Last mit 30km langer Freileitung

Jedoch ähnelt die Abbildung 46 des U_KW eher der ohne Leitungssystem. Dies liegt daran, dass der Generator mehr induktive Blindleistung bereitstellen kann als kapazitive. Und somit wird der Blindleistungsbedarf der kurzen Freileitungsstrecke vom U_KW problemlos

getragen. Eine größere Phasenverschiebung (kleinerer $\cos()$) nach zwölf Sekunden zeigt aber, dass die Freileitung auch merklich Blindleistung bezieht. Die geringere abgegebene Scheinleistung ist durch den Spannungsabfall über der Freileitung und der somit geringeren Lastabnahme zu begründen (siehe dazu Abbildung 48).

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Phasenverschiebung die Blindleistung im Netz beeinflussen kann. Es wurde gezeigt wie sich Kabel und Freileitung bei verschiedenen Phasenverschiebungen durch das I_KW verhalten. Das simulierte Netz verhielt sich naturgetreu.

2.4 Tageslastgang

Ein Ziel dieser Arbeit war es den Tageslastgang verschiedener Lasten nachbilden zu können. Dazu wurde im Vorfeld ein Subsheet erstellt, welches durch zwei unabhängige Tabellen alle Belastungsvarianten umsetzen kann. Vorangegangene Überlegungen definierten den Inhalt der Tabellen durch die Scheinleistung und der dazugehörigen Phasenverschiebung. Diese Variante wurde aber wieder verworfen, da die Berechnung des Phasenwinkels einen Mehraufwand im Vorfeld oder einen rechenintensiveren Aufwand während der Simulation erfordert hat. Die aktuelle Variante wird wie das Standardlastmodell von Portunus über eine Wirk- und eine Blindleistungstabelle gesteuert. Somit können gemessene oder prognostizierte Werte unmittelbar eingetragen und simuliert werden. Es wäre auch möglich die Blindleistungstabelle durch eine Funktion in Abhängigkeit der Wirkleistungstabelle zu ersetzen. Dies würde den belastungsabhängigen Fall der Blindleistung von der übertragenen Wirkleistung darstellen.

Die Ermittlung des Tageslastganges ist ein aufwändiger Prozess an dem neben den einspeisenden Netzanschlussnehmern, den Vertreibern von elektrischer Energie auch Erfahrungswerte eine wichtige Rolle spielen. Da elektrische Leistung nur in begrenztem Maße vorgehalten werden kann, ist die Ausbalancierung von Erzeugung und Abnahme kritisch. Aus diesem Grund wurden früher Kraftwerksfahrpläne im Jahresrhythmus erstellt und durch Reserveleistung in kritischen Stunden gestützt. Mit dem Wandel der Energieerzeugung von zentralisierten Großkraftwerkwerken hin zu dezentralisierten und teilweise regenerativen Einspeisern musste sich auch die Form der Planung der benötigten Energie ändern. Das heutige Energiemanagement ist eine Folge des liberalisierten offenen Energiemarktes. Jeder kann elektrische Energie einspeisen oder beziehen solange er die rechtlichen Grundlagen, sowie die technischen Forderungen erfüllt. Betreibern von Übertragungsnetzen und Verteilungsnetzen sind verpflichtet diese Möglichkeit diskriminierungsfrei zu ermöglichen solange die Stabilität des Netzes nicht gefährdet wird. Um aus dieser Vielfalt von Einspeisern und Abnehmern für jedes konventionelle Kraftwerk einen Fahrplan zu ermitteln und Abweichungen vom Soll- zum Istwert ausgleichen zu können, sind Vertreter und Erzeuger angewiesen verschiedene Bilanzkreise zu führen. Einer dieser Bilanzkreise, zuständig für Mehr- und Mindermengen, gewinnt mit Zunahme der regenerativen Einspeisern immer mehr an Bedeutung. Da diese Erzeuger von Umwelteinflüssen stark abhängig sind.

Die Simulation erfolgt unter Verwendung des normierten Standard Lastprofils der Haushalte H0 des Landes Nordrhein-Westfalen vom 15.01.2011.

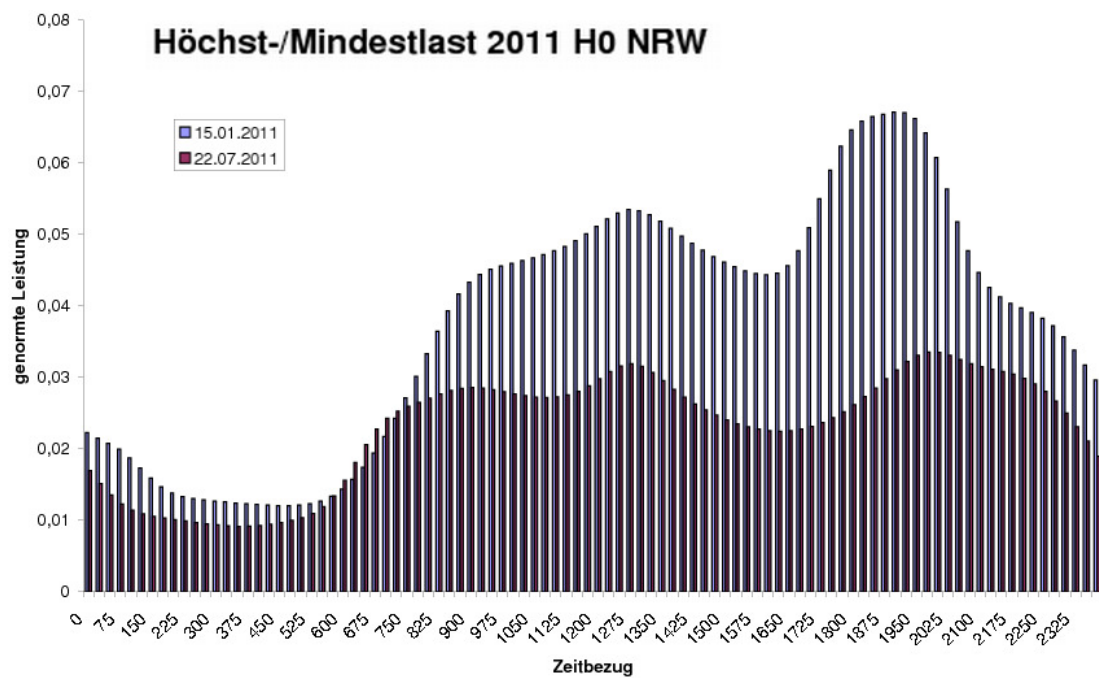


Abbildung 49 Vergleich Standardlastprofil H0 2011

Der Aufbau der Simulation ähnelt dem aus Kapitel 1.3.3 und ist in Abbildung 50 dargestellt. Hinzu kam noch das Phasenschiebermodul I_KW. Es wurde so eingestellt, das es die Blindleistung übernimmt, damit es zu keinem Spannungseinbruch bei den Lastspitzen (circa 13:00 Uhr und 19:00 Uhr). Die Vorgaben erhält das I_KW von der „lph“ Tabelle und einem festen Wert. Die Werte des Lastprofils wurden mit einem Faktor versehen um das Kraftwerk entsprechend auslasten zu können. Des Weiteren wurde der Zeitraum von 24h auf 24s gestaucht.

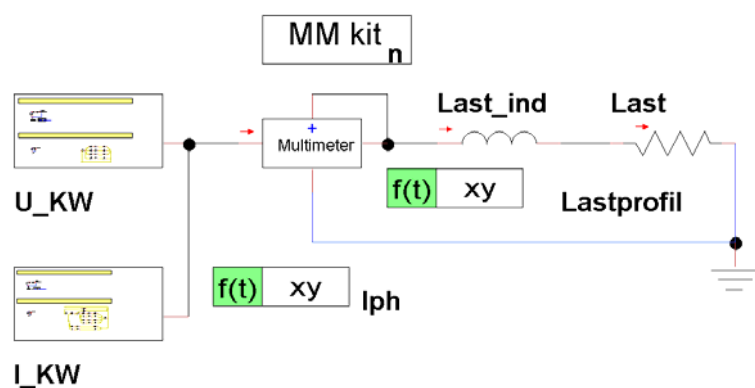


Abbildung 50 Aufbau der Simulation

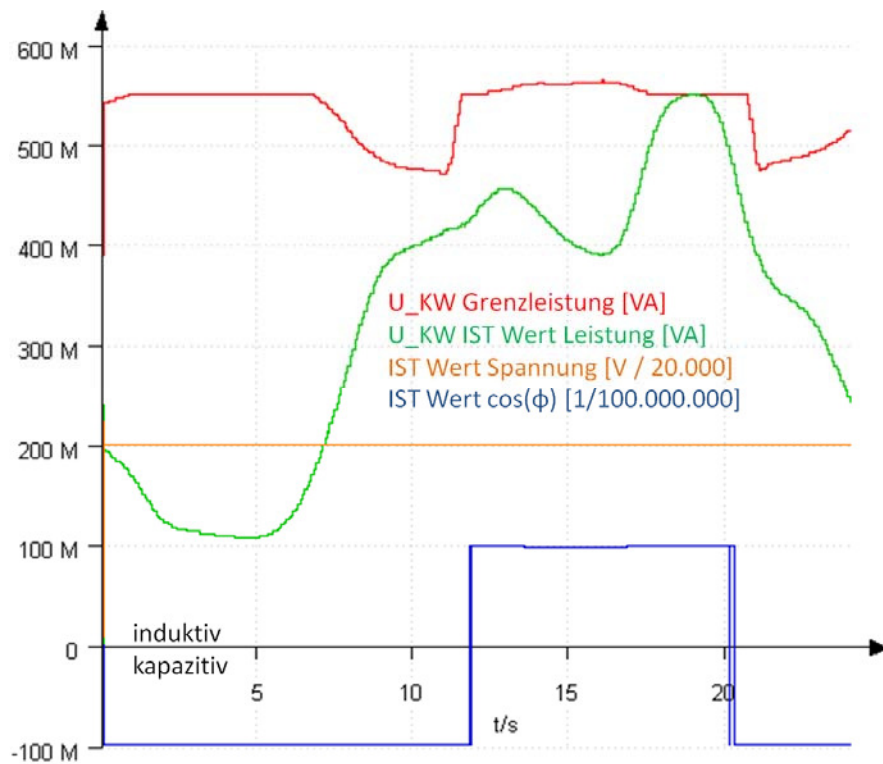


Abbildung 51 U_KW Leistungs- und Spannungskurven

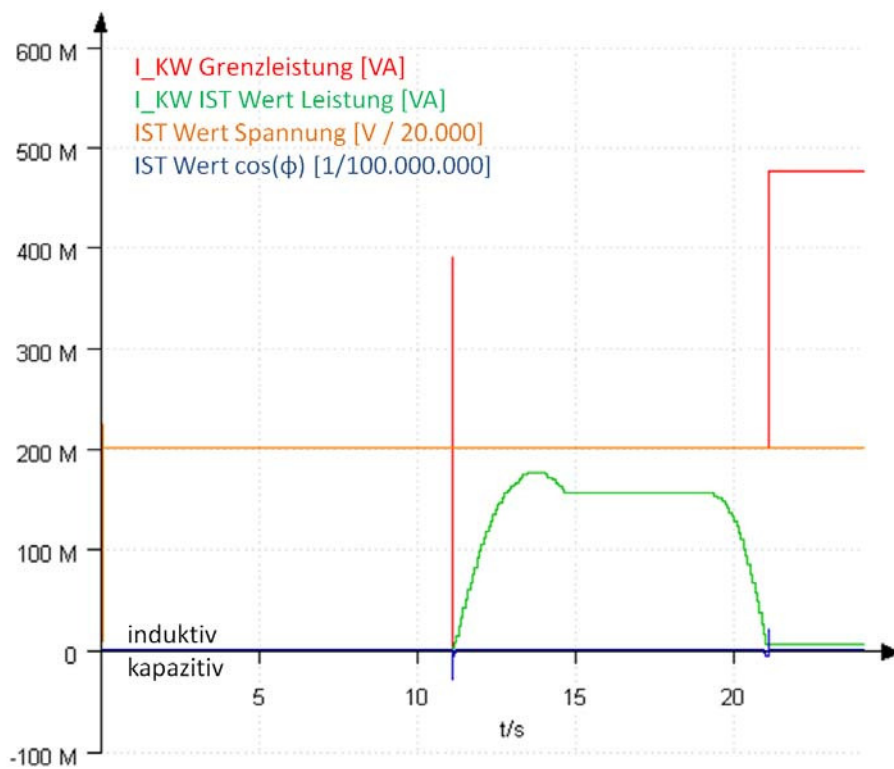


Abbildung 52 I_KW Leistungs- und Spannungskurven

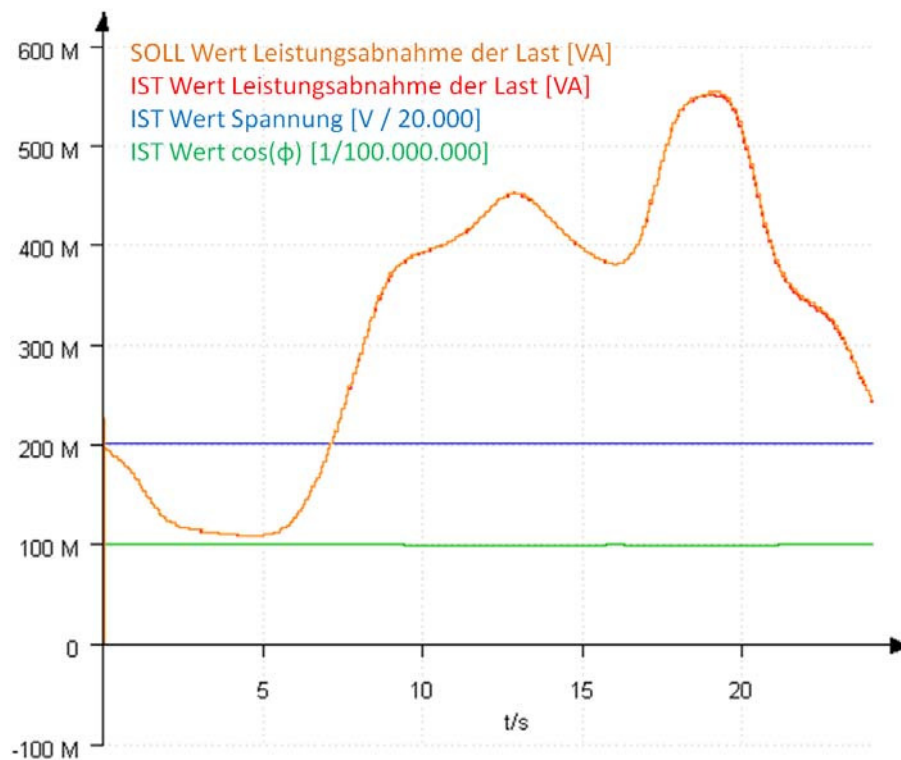


Abbildung 53 Last Leistungs- und Spannungskurven

Die Last folgt dem eingprägten Profil (Abbildung 53). Ohne die zusätzliche Einspeisung von Blindleistung durch das I_KW, wüde wie in Abbildung 24 Demonstration Leistungs- begrenzung die Spannung einbrechen. Da das I_KW bis zum Einschalten bei elf Sekunden keinen Strom abgibt, ist auch dessen Grenzleistung Null. Die Grenzleistungskurve überlagert sich im Zeitraum von elf bis einundzwanzig Sekunden mit der Spannungskurve und ist daher nicht sichtbar.

Fazit, die Verwendung von genormten Lastprofilen ist unter hinzunahme ein Anpassungs- faktor problemlos. Die Stauchung der simulierten Zeit von Stunden auf Minuten ist eben- falls möglich. Und erlaubt somit die Verkürzung der Rechenzeit.

3 Fazit

Die in der Arbeit erstellten und modifizierten Modelle, liefern die Grundlage für eine grobe Analyse von elektrischen Netzen. Es können dabei Untersuchungen mit verschiedenen Generatoren, Leitungstypen, sowie verschiedenen Lastprofilen durchgeführt werden. Die Parametrierung durch Messwerte oder Vorgabewerten ist möglich. Dank der schnellen Regler ist die Abbildung von größeren Zeiträumen wie zum Beispiel 24h durch Stauchung möglich. Mit steigender Komplexität und Größe des simulierten Netzes, wird auch dessen benötigte Rechenleistung exponentiell größer. So wurden in dieser Arbeit nur einfache Strahlennetze simuliert, deren Berechnungsdauer wenige Minuten in Anspruch nahm. Wie in Kapitel 1.3.3 schon erwähnt, ist eine Optimierung der Regler noch möglich wodurch sich die Simulationszeit noch weiter Reduzieren wird.

Die Simulationsumgebung Portunus besitzt grundlegende Voraussetzungen für Untersuchungen im Bereich der E-Mobilität und des Smart Grids. Die Konstruktion eines übergeordneten Energiemanagementsystems ist durch die Verwendung von Zustandsgraphen möglich. Da zu Beginn der Arbeit noch nicht alle Modelle funktionsfähig waren, ist dieses Managementsystem nicht Teil der Arbeit.

Das Ziel der Modellierung eines repräsentativen Sektors des Stromverteilernetzes vom Stand 2010 bis 2050 wurde nicht erreicht. Die Einarbeitung in Portunus und Erarbeitung der Simulationsmodelle beanspruchte zu viel Zeit.

Die nächsten Schritte wären die Sammlung von Daten zur Abbildung eines realen Teilnetzes, die Erstellung des übergeordneten Energiemanagements, sowie dem hinzufügen weiterer Modelle zu Lastflusssteuerung. Mit diesen Mitteln dürfte ein Einblick in die Auswirkungen der Entwicklung des Energiesektors möglich sein.

Literatur

[CraVa07]	Crastan, Valentin: Elektrische Energieversorgung 1, Berlin Heidelberg New York, Springer-Verlag, 2007
[HeuKl10]	Heuck, u.a.: Elektrische Energieversorgung, Wiesbaden, Vieweg+Teubner Verlag, 2010
[BenGr07]	Benysek, Grzegorz: Improvement in the Quality of Delivery of Electrical Energy using Power Electronics Systems, London, Springer-Verlag, 2007
[TrCo07]	Hermann, u.a.: TransmissionCode 2007, Berlin, VDN, 2007
[DiCo07]	Hermann, u.a.: DistributionCode 2007, Berlin, VDN, 2007
[BeNe07]	Meyer, u.a.: Technische Regeln zur Beurteilung von Netzurückwirkungen, Berlin, VDN, 2007
[ErMs08]	Unbekannt: Technische Richtlinie – Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz, Berlin, BDEW, 2008
[WebH09]	Weber, H.: Auswirkungen zunehmender Windenergieeinspeisung auf den Kraftwerksbetrieb in Deutschland, Online, Zeitschrift: VGB PowerTech, Ausgabe 06/2009
[StrR12]	Streck, R.: Warten auf den Blackout in Frankreich, Heise Online, http://www.heise.de/tp/artikel/36/36396/1.html , verfügbar am 20.02.2012 15:30 Uhr

[Bund12]	Bundesministerium für Bildung und Forschung: Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität 2009, http://www.bmbf.de/pubRD/nationaler_entwicklungsplan_elektromobilitaet.pdf , verfügbar am 10.02.2012 15:30 Uhr
[TW11]	TW.: Gutachten des Windpark Bönitz, Ingenieurbüro Energieeinsparung GmbH, 29.09.2011
[MeyNi12]	Meyer, Nick: Forschungsbericht E ³ - Energieeffiziente Elektromobilität und Gebäudetechnik, Februar 2012
[Thiem11]	Thiem: Foliensatz EANL - Kapitel 1.6 Synchronmaschine, Hochschule Mittweida, 2011
[OtJu94]	Justus, Otto: Berechnung linearer und nichtlinearer Netzwerke, Leipzig, Köln : Fachbuchverlag, 1994
[AdSol10]	Unbekannt: Hilfefunktion der Simulationsumgebung Portunus, Adapted Solutions
[KISi08]	Kleinert: Vorlesung „Energieübertragung und Verteilung“, Hochschule Mittweida, 2008

Anlagen

Teil 1 A-I

Teil 2 A-V

Teil 3 A-VI

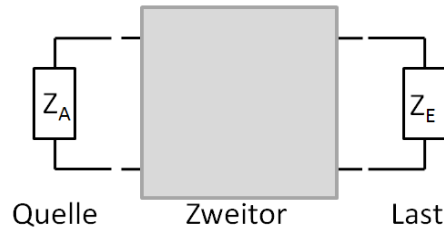
Anlagen, Teil 1

Validierung der modifizierten Gleichungen des Leitungsmodells

Lastberechnung (Ausgangsleistung des Zweitores)

Vorgaben $U_n := 10 \text{ kilo} \cdot \text{V}$
 $u_{\text{tol}} := 0\%$
 $P := 425 \text{ Mega} \cdot \text{W}$
 $Q := 385 \text{ Mega} \cdot \text{V} \cdot \text{A}$

Berechnung



$$Z_E := \frac{[U_n \cdot (1 - u_{\text{tol}})]^2}{(P + j \cdot Q)} \cdot \frac{1}{\Omega}$$

$$|Z_E| = 174.382 \text{ milli}$$

$$\begin{pmatrix} U_E \\ I_E \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} U_n \cdot (1 - u_{\text{tol}}) \\ \frac{U_n \cdot (1 - u_{\text{tol}})}{Z_E} \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{\text{V}}$$

$$\begin{pmatrix} U_E \\ I_E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10 \\ 42.5 - 38.5i \end{pmatrix} \text{ kilo}$$

$$S_E := \begin{pmatrix} U_E \\ I_E \end{pmatrix}_{0,0} \cdot \overline{\begin{pmatrix} U_E \\ I_E \end{pmatrix}_{1,0}}$$

$$S_E = 425 + 385i \text{ Mega}$$

$$|S_E| = 573.454 \text{ Mega}$$

Leitungsberechnung

Vorgaben Freileitungsparameter der Enviam

$$\text{Widerstandsbelag } R' := 0.306 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$\text{Reaktanzbelag } X' := 0.362 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$\text{Kapazitätsbelag } C' := 0.010 \frac{\mu \cdot \text{F}}{\text{km}}$$

$$\text{Ableitbelag } G' := 0.0 \frac{\mu \cdot \text{S}}{\text{km}}$$

$$\text{zulässiger Dauerstrom } I_{\text{zul}} := 350 \text{ A}$$

$$\text{Leitungslänge } L_{\text{aenge}} := 500 \text{ km}$$

Berechnung benötigter paralleler Leitungen

$$\text{Auslastung} := 50\%$$

$$\text{para} := \left\lceil \frac{I_E}{\text{Auslastung} \cdot I_{\text{zul}}} \right\rceil$$

$$\text{para} = 327.688$$

$$\text{para} := 350$$

Herleitung der Zweitorparameter

$$L' := \frac{X'}{\omega}$$

$$Z_W := \sqrt{\frac{R' + j \cdot \omega \cdot L'}{G' + j \cdot \omega \cdot C'}} \cdot \frac{1}{\Omega}$$

komplexe Wellenwiderstand

$$Z_W = 364.766 - 133.514i$$

$$\gamma := \sqrt{(R' + j \cdot \omega \cdot L') \cdot (G' + j \cdot \omega \cdot C')}$$

komplexe Ausbreitungskonstante

$$\gamma = (0.419 + 1.146i) \frac{1}{m} \mu$$

$$A := \begin{pmatrix} \cosh(\gamma \cdot \text{Laenge}) & Z_W \cdot \sinh(\gamma \cdot \text{Laenge}) \\ \frac{1}{Z_W} \cdot \sinh(\gamma \cdot \text{Laenge}) & \cosh(\gamma \cdot \text{Laenge}) \end{pmatrix}$$

Berechnung der Kettenmatrix durch Gleichungen der Wellentheorie

$$Y_1 := \frac{1}{A_{0,1}} \cdot \begin{pmatrix} A_{1,1} & -|A| \\ 1 & -A_{0,0} \end{pmatrix}$$

Berechnung der Admittanzmatrix

$$Y_{\text{sum}} := \text{para} \cdot Y_1$$

Einbeziehung der parallelen Leitungssysteme

$$A_{\text{para}} := \frac{1}{Y_{\text{sum}_{1,0}}} \cdot \begin{pmatrix} -Y_{\text{sum}_{1,1}} & 1 \\ -|Y_{\text{sum}}| & Y_{\text{sum}_{0,0}} \end{pmatrix}$$

Rückrechnung auf Kettenmatrix

Berechnung der Eingangsleistungen (Quellenleistung)

$$\begin{pmatrix} U_A \\ I_A \end{pmatrix} := A_{\text{para}} \begin{pmatrix} U_E \\ I_E \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} U_A \\ I_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 45.06 + 7.549i \\ 40.696 - 22.959i \end{pmatrix} \text{kilo}$$

$$S_A := \begin{pmatrix} U_A \\ I_A \end{pmatrix}_{0,0} \cdot \overline{\begin{pmatrix} U_A \\ I_A \end{pmatrix}_{1,0}}$$

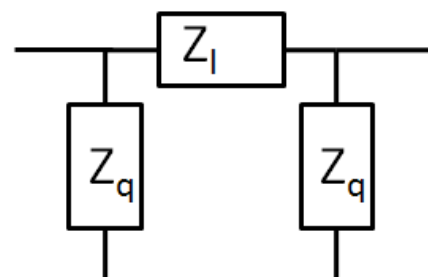
$$S_A = 1.66 \times 10^3 + 1.342i \times 10^3 \text{ Mega}$$

$$|S_A| = 2.135 \times 10^3 \text{ Mega}$$

Berechnung der Parameter des PI - Ersatzschaltbildes

$$A_{\text{PI}} := \begin{pmatrix} \frac{Z_1 + Z_q}{Z_q} & Z_1 \\ \frac{2 \cdot Z_q + Z_1}{Z_q^2} & \frac{Z_1 + Z_q}{Z_q} \end{pmatrix}$$

Berechnung der Kettenmatrix durch Gleichungen des PI - Ersatzschaltbildes



$$Z_1 := A_{\text{para}_{0,1}} \cdot \Omega$$

Längsimpedanz des PI - Ersatzschaltbildes

$$Z_q := \frac{Z_l}{A_{\text{para}1,1} - 1}$$

$$Z_l = (0.396 + 0.51j) \Omega$$

Querimpedanz des PI -
Ersatzschaltbildes

$$Z_q = (0.074 - 3.552j) \Omega$$

Vergleich der beiden Berechnungsmethoden

Simulation in Portunus

Berechnung von MathCAD

Leitungslänge

$$Laenge = 500\text{km}$$

$$Laenge = 500\text{km}$$

Leitungsresistanz

$$\frac{R' \cdot Laenge}{para} = 437.143\text{milli}\Omega$$

$$\text{Re}(Z_l) = 396.385\text{milli}\Omega$$

Leitungsreaktanz (induktiv)

$$\frac{X' \cdot Laenge}{para} = 517.143\text{milli}\Omega$$

$$\text{Im}(Z_l) = 509.756\text{milli}\Omega$$

Leitungsreaktanz (kapazitiv)

$$\frac{-2}{\omega \cdot C' \cdot Laenge \cdot para} = -3.638 \Omega$$

$$\text{Im}(Z_q) = -3.552 \Omega$$

Leistungen der Last

$$P_{\text{simuliertE}} := 432\text{Mega}$$

$$\text{Re}(S_E) = 425\text{Mega}$$

$$Q_{\text{simuliertE}} := 376\text{Mega}$$

$$\text{Im}(S_E) = 385\text{Mega}$$

Leistungen der Quelle

$$P_{\text{simuliertA}} := 490.1\text{Mega}$$

$$\text{Re}(S_A) = 16.60510^8$$

$$Q_{\text{simuliertA}} := 441.38\text{Mega}$$

$$\text{Im}(S_A) = 10^8$$

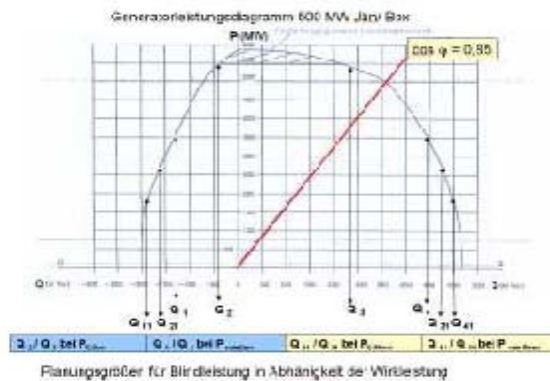
"Freileitung"	"Portunus"	"MathCAD"
"Länge = 1km"	0	0
"P - Last"	424.82	425
"Q - Last"	384.45	385
"P - Quelle"	427.76	427.88
"Q - Quelle"	387.75	388.29
"Länge = 500km"	0	0
"P - Last"	430.88	425
"Q - Last"	385.75	385
"P - Quelle"	1833.63	1660.5
"Q - Quelle"	1346.35	1341.8

Fazit:

Die verwendeten Gleichungen zeigen innerhalb der Gültigkeit (Bsp Laenge = 1km) des PI - Ersatzschaltbildes geringe Abweichungen. Ist die Leitung keine elektrisch kurze Leitung mehr (Beispiel 500km), treten erhebliche Abweichungen auf.

Anlagen, Teil 2

Jähnschwalde Generator 500MW Leistungsdiagramm
(Datei: P-Q-Diagramm-Jän.ppt)



Erstellen Tabelle

Generatorleistung :=

Spalte 0 = P
Spalte 1 = Q

	0	1
0	550	-0.1
1	550	...

Bezugswert für p.u. System

$$P_n = 500$$

Vektorielle Berechnung $\cos(\varphi)$, S_{Gen} mit Vorzeichen im p.u. System

$$i := 0..44 \quad j := 0..1$$

$$P_{Gen_i} := \text{Generatorleistung}_{i,0}$$

$$Q_{Gen_i} := \text{Generatorleistung}_{i,1}$$

$$S_{Gen} = \frac{\sqrt{P_{Gen}^2 + Q_{Gen}^2}}{P_n}$$

Verschiebungswinkelberechnung mit Vorzeichen

$$\text{tmp} := \cos\left(\arctan\left(\frac{Q_{Gen}}{P_{Gen} + 10^{-6}}\right)\right)$$

$$\text{tmp2}_{i,i} := \text{tmp}_i$$

$$\text{cosphi}_{Gen} := \text{tmp2} \cdot \text{sign}(Q_{Gen})$$

Aufbereiten der Ausgabetable und Ausgabe in Datei

$$\text{Leistungsbegrenzung}_{i,1} := S_{Gen_i}$$

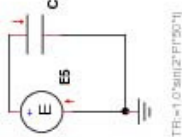
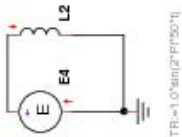
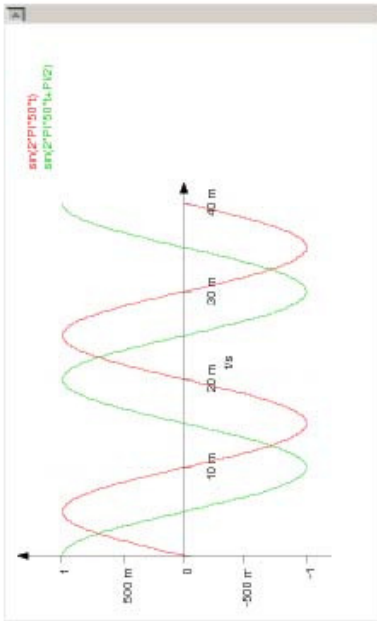
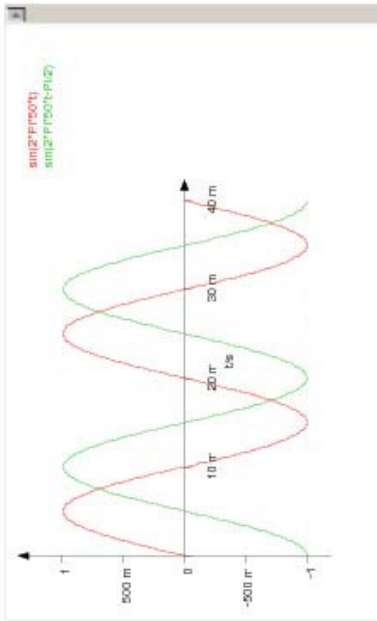
$$\text{Leistungsbegrenzung}_{i,0} := \text{cosphi}_{Gen_i}$$

Leistungsbegrenzungstabelle.txt

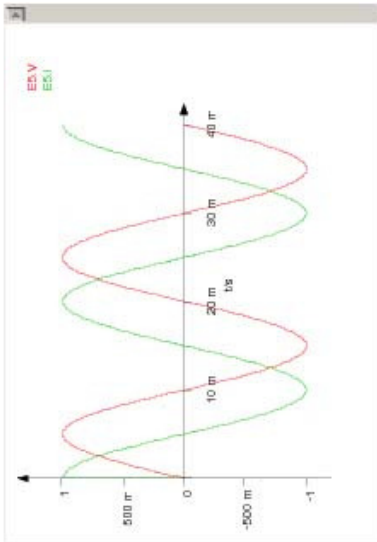
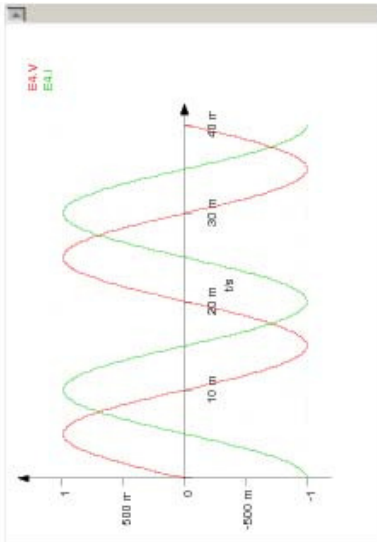
Anlagen, Teil 3

Darstellung der Phasenverschiebung

Bei Vorgabe einer Sinus - Funktion
 -phi induktiver Charakter
 +phi kapazitiver Charakter



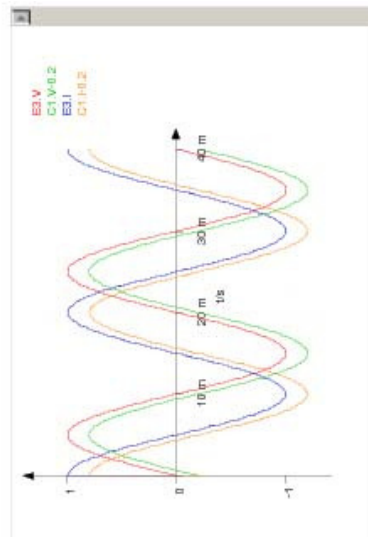
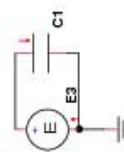
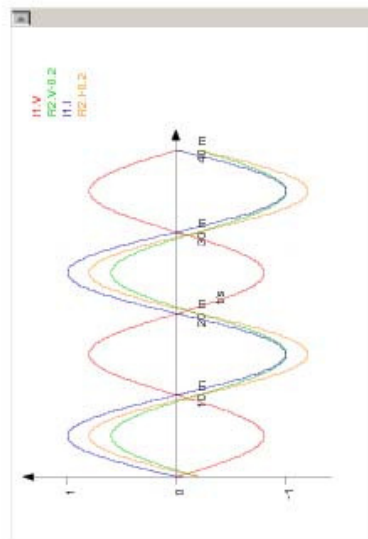
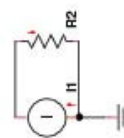
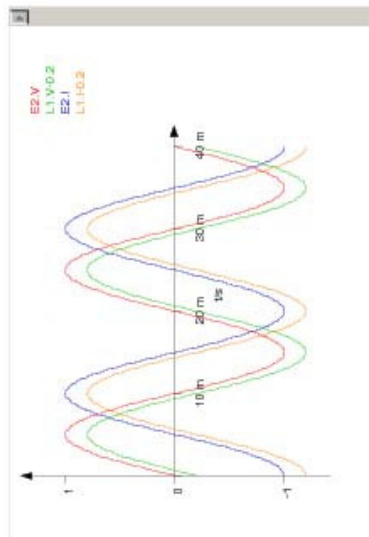
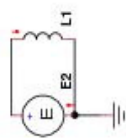
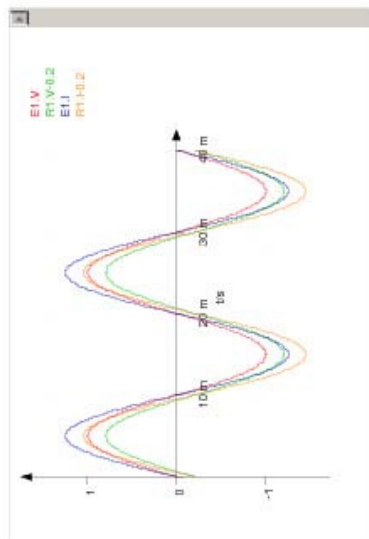
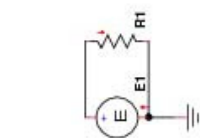
Darstellung der Spannungs-Strom-Beziehung
 Induktivität - Strom nachteilend (L=U)
 Kapazität - Strom vorleitend (C=U)



Darstellung der Phasenlage von Spannung und Strom

Achtung, zur besseren Darstellung wurden die Spannungs- und Stromwerte von R, L, C um 0.2 nach unten verschoben.

Darstellung verschiedener Zählpeilsysteme
 Spannungsquelle - Verbraucherzählpeilsystem
 Stromquelle - Erzeugerzählpeilsystem
 Widerstand - Verbraucherzählpeilsystem



Darstellung der Spannungs-Strom-Beziehung
 Induktivität - Strom nachteilend ($L=UI$)
 Kapazität - Strom vorteilend ($C=UI$)

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida den 28.02.2012

Steffen Oehme